

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof.dr.sc. Toma Udiljak

Student:

Boris Botički

Zagreb, 2010.

SAŽETAK

Nadzor procesa obrade i reznoga alata su sve prisutniji zahtjevi u obradnim sustavima. Ugradnjom vanjskih senzora često se narušavaju karakteristike obradnog sustava, pa se za nadzor procesa i alata sve više koriste signali iz upravljačkih sklopova. Softverski moduli nadgledanja integrirani u upravljački sustav, nasuprot klasičnim eksternim sustavima nadgledanja, nude ekonomično i jednostavno rješenje. Kombinacija digitalnih pogonskih signala i internih podataka upravljačkog sustava stroja, uz napredne metode analize signala, u mnogim slučajevima može zamijeniti eksterne sustave nadzora.

U radu su istražene mogućnosti određivanja sila rezanja u postupku bušenja na temelju izlaznih informacija regulatora sinkronih motora s permanentnim magnetima. Način rada adaptivnog vođenja alatnih strojeva je takav da se kontinuirano mjere stvarni uvjeti obrade. Adaptivnim vođenjem alatnih strojeva se povećava produktivnost alata, povećava se produktivnost strojeva, smanjuju troškovi obrade, eliminira se mogućnost oštećenja alata, obratka i stroja, nadgleda radni vijek alata, povećava se kvaliteta izradaka

U prvom dijelu rada objašnjena je obrada odvajanjem čestica, pri čemu je posebna pozornost pridodana postupku bušenju.

Drugi dio rada počinje sa podjelom elektromotora i njihovim općenitim svojstvima, a kasnije je detaljno analiziran način rada regulatora sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima.

Rad pokriva nužne pretpostavke za provođenje eksperimentalnog dijela, koji će biti izvršen kasnije u statičkim i dinamičkim uvjetima.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	- 3 -
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	- 5 -
IZJAVA.....	- 8 -
1. Uvod	- 9 -
2. Nadzor procesa i sustava	- 12 -
2.1 Adaptivno vođenje alatnih strojeva.....	- 13 -
3. Obrada odvajanjem čestica.....	- 15 -
3.1 Bušenje	- 22 -
3.2 Alati za bušenje - svrdla	- 23 -
3.3 Izrada svrdla	- 29 -
3.4 Materijali i prevlake za izradu svrdla	- 32 -
3.5 Geometrijski parametri odvojenog sloja kod bušenja	- 33 -
3.6 Elementi režima obrade kod bušenja	- 34 -
3.7 Trošenje i zatupljivanje svrdla	- 38 -
3.8 Utjecajni faktori prilikom odabira brzine rezanja kod bušenja	- 40 -
3.8.1 Utjecaj vijeka trajanja svrdla.....	- 41 -
3.8.2 Utjecaj promjera svrdla	- 41 -
3.8.3 Utjecaj posmaka	- 41 -
3.8.4 Utjecaj dubine izbušenog provrta.....	- 42 -
3.8.5 Utjecaj oblika brušenja svrdla	- 42 -
3.8.6 Utjecaj hlađenja i podmazivanja	- 42 -
3.9 Sile rezanja i momenti kod bušenja.....	- 43 -
4. Elektromotorni pogon.....	- 47 -
4.1 Glavni dijelovi elektromotornog pogona	- 47 -
4.2 Podjela elektromotora	- 49 -
4.3 Sinkroni elektromotori	- 50 -
4.4 Permanentni magneti.....	- 53 -
4.5 Elektromotori s permanentnim magnetima (PM).....	- 54 -
4.6 Sinkroni elektromotori s permanentnim magnetima (PMSM).....	- 55 -
4.6.1 Vektorska regulacija momenta.....	- 57 -
4.6.2 Digitalna regulacija sinkronih elektromotora s permanentnim magnetima	- 63 -
4.6.3 Regulacija u normalnim uvjetima rada	- 64 -
4.6.4 Resetiranje pozicije namještanjem rotora	- 65 -
4.6.5 Određivanje struja	- 67 -
4.6.6 Određivanje aksijalne sile bušenja	- 69 -
5. Zaključak	- 71 -
6. Literatura	- 72 -

POPIS SLIKA

Slika 1. Prvi NC stroj M.I.T. [2]	10
Slika 2. Razvoj alatnih strojeva [3]	10
Slika 3. Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [9]	16
Slika 4. Materijali i prevlake reznih alata [11]	18
Slika 5. Proces odvajanja čestice [12]	20
Slika 6. Podjela svrdla prema geometriji [12]	24
Slika 7. Spiralno svrdlo [12]	25
Slika 8. Presjek spiralnog svrdla [14]	26
Slika 9. Svrdla s različitim kutom zavojnice utora ω [14]	27
Slika 10. Podjela svrdla prema geometriji oštrice [15]	28
Slika 11. Izrada svrdla valjanjem [14]	30
Slika 12. Izrada svrdla glodanjem [14]	30
Slika 13. Izrada svrdla brušenjem [14]	31
Slika 14. Parametri odvojene čestice kod bušenja [12]	34
Slika 15. Shematski prikaz bušenja spiralnim svrdlom [9]	34
Slika 16. Prikaz presjeka odvojene čestice po jednoj oštrici za predbušenu rupu [12]	35
Slika 17. Prikaz raspodjele brzine rezanja po oštrici svrdla [12]	37
Slika 18. Prikaz trošenja reznih ploha na svrdlu [12]	38
Slika 19. Prikaz istrošenja slobodne plohe [12]	39
Slika 20. Sile rezanja u procesu bušenja [14]	44
Slika 21. Sile rezanja kod bušenja [14]	46
Slika 22. Osnovna struktura upravljanja elektromotornog pogona [17]	48
Slika 23. Podjela električnih strojeva [17]	49
Slika 24. Trofazni sinkroni elektromotor [17]	52
Slika 25. Trofazni elektromotor s permanentnim magnetima [19]	56
Slika 26. Regulacijski krug sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima [20]	56

Slika 27. Blok dijagram vektorske kontrole PMSM [19]	57
Slika 28. Prostorni vektor struje statora [19]	58
Slika 29. Primjena glavnog koordinatnog sustava [19]	61
Slika 30. Trofazni inverter [19]	63
Slika 31. PWM - Pulse Width Modulation (podešavanje širine pulsa) [19]	64
Slika 32. Nominalna brzina i područje slabljenja polja [19]	65
Slika 33. Namještanje rotora [19]	66
Slika 34. Blok dijagram namještanja rotora [19]	66
Slika 35. Mjerenje struje preko šantovih otpornika [19]	67
Slika 36. Oblici napona dva različita PWM perioda [19]	67
Slika 37. Trofazni sinusni napon podijeljen po sektorima [19]	68

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Značenje
A1	mm ²	površina poprečnog presjeka odvojene čestice jedne oštrice
a_p	mm	dubina rezanja
b	mm	širina odvojene čestice
B	T	magnetska indukcija
c_m	Wb	konstante momenta
C_v		konstanta ovisna o materijalu obratka
d_1	mm	promjer svrdla
D	mm	promjer provrta na obratku
f	mm	posmak
f	Hz	frekvencija
f_z	mm	posmak po oštrici svrdla
F_a	N	aksijalna sila bušenja
F_C	N	glavna sila rezanja
F_{CP}	N	glavna sila rezanja poprečne oštrice
F_f	N	posmična sila
F_{fp}	N	posmična sila poprečne oštrice
F_P	N	natražna sila
F_t	N	sila trenja
H	A/m	jakost magnetskog polja
H_c	A/m	koercitivna sila
h	mm	debljina odvojene čestice
l	mm	konstanta kugličnog navojnog vretena (korak)
i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}	A	trenutne vrijednosti struje na statoru na fazama SA, SB i SC
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	A	Trenutne vrijednosti komponente struje statora
\vec{i}_s	A	prostorni vektor struje statora
i_{sd}, i_{sq}	A	Vrijednost struja na d i q osima

k		transformacijska konstanta
k_c	$\frac{N}{mm^2}$	specifična glavna sila rezanja
l_a	mm	dubina bušenja
l_1	mm	ukupna duljina svrdla
l_2	mm	duljina radnog dijela svrdla
L_s	Vs/A	induktivitet statora
m		konstanta ovisna o materijalu obratka
M_{Fc}	Nm	moment glavnih sila rezanja
M_{Fp}	Nm	moment glavnih sila rezanja na poprečnoj oštrici
M_{Ft}	Nm	moment sila trenja
M_U	Nm	ukupni moment
n	min-1	broj okretaja
$^u_{SA}, ^u_{SB}$ $, ^u_{SC}$	V	trenutne vrijednosti napona na statoru na fazama SA, SB i SC
$^u_{S\alpha, \beta}$	V	statorski napon
$^u_{Sd}, ^u_{Sq}$	V	Vrijednost napona na d i q osima
v_c	m/min	brzina rezanja
v_m	m/min	srednja brzina rezanja
v_f	mm/min	posmična brzina
p		broj pari polova
R_s	Ω	otpor statora
T_L, T_e	Nm	moment
t	mm	dubina rezanja
T	h	vrijeme trajanja alata (postojanost)
T_c	°C	Curieva temperatura
μ_0		konstante ovisne od materijala

y_0		konstanta ovisna o materijalu obratka
α	°	stražnji geometrijski kut
β	°	kut između prednje i stražnje površine
γ	°	prednji geometrijski kut
2φ	°	kut vrha svrdla
ψ	°	kut poprečne oštrice
$\psi_{SA},$ $\psi_{SB},$ ψ_{SC}	Wb	trenutne vrijednosti magnetskog toka na statoru na fazama
$\psi_{S\alpha,\beta}$	Wb	magnetski tok statora
ψ_M	Wb	magnetski tok rotora
$\psi_{Sd},$ ψ_{Sq}	Wb	Magnetski tok na d i q osima
Θ_r	°	pozicija rotora u α, β koordinatnom sustavu
Θ_g	°	kut između osi x i α
ω	°	kut zavojnice utora
ω_s	rad/ s	sinkrona kutna brzina rotora
ω_g	rad/ s	glavna brzina
ν		učinkovitost kugličnog navojnog vretena

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno, koristeći se znanjem i vještinama stečenim tokom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, te navedenom literaturom.

Zahvaljujem se na pomoći, savjetima, ustupljenoj literaturi, te utrošenom vremenu i trudu svome mentoru prof.dr.sc. Tomi Udiljaku.

Također se zahvaljujem stručnom suradniku dipl. ing. Tomislavu Staroveškom na pruženoj pomoći, savjetima, ustupljenoj literaturi, te utrošenom vremenu i trudu.

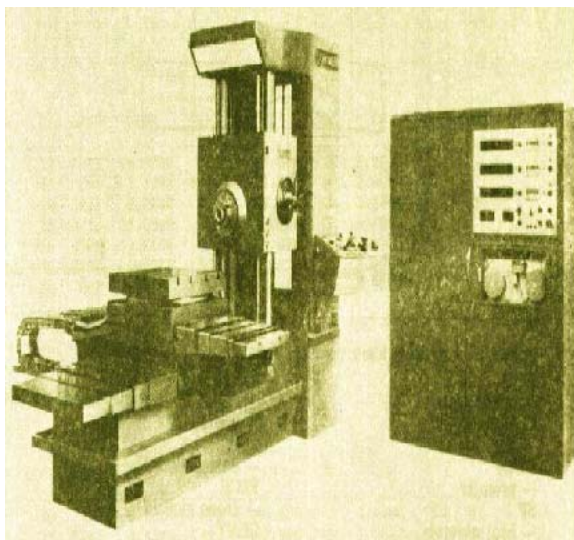
Na kraju, najveću zahvalnost dugujem svojoj obitelji na beskrajnoj podršci i razumijevanju koje su mi ukazali tokom dosadašnjeg dijela studija.

1. Uvod

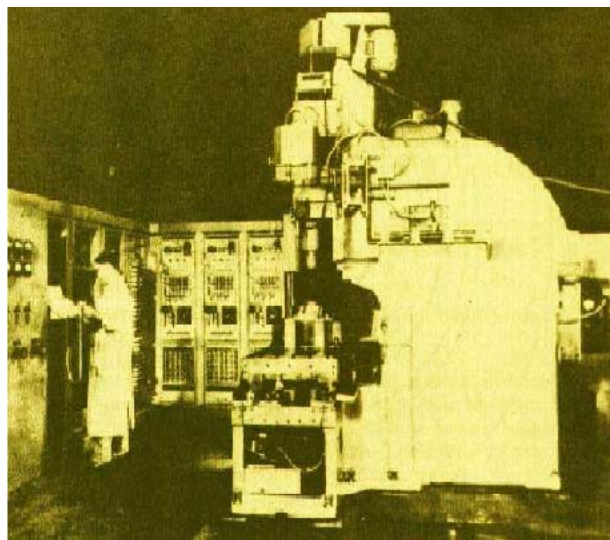
Alatni strojevi su strojevi koji imaju mogućnost i sposobnost izrađivati sami sebe, a definiraju se kao strojevi koji služe za obradu i izradu pojedinih dijelova svih ostalih strojeva i uređaja.

Suvremeni inteligentni sustavi su svoj razvoj i primjenu čekali otprilike 250 godina od pojave prvih strojeva. Njima je prethodio razvoj: alatnih strojeva (prvi tokarski stroj 1717.g. Velika Britanija), automatskog upravljanja, obradnih strojeva (prvi jednovretni tokarski stroj 1873-1880.g.), kompjutorske tehnike (prvi elektronski digitalni kompjuter 1943-1946.g.), numeričkog upravljanja (1947.g. SAD), numerički i kompjuterski upravljanih alatnih strojeva (1952.g. na M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) je predstavljen prvi NC stroj, a 1972.g. prvi CNC stroj), programskih jezika (prvi programski jezik APT za strojno programiranje je razvijen 1958.g. na M.I.T.), specijalnih mehanizama sa šest stupnjeva slobode, razvoj fleksibilnih obradnih sustava, razvoj fleksibilnih proizvodnih sustava (1978.g.) nastanak automatizirane tvornice dobivene povezivanjem više obradnih sustava (tvornica CIM 1986/1987.g.).

Zagreb je kolijevka proizvodnje alatnih strojeva u Hrvatskoj, a i u širem dijelu jugoistočne Europe. U tvornici braće Ševčik je 1936.godine proizveden prvi alatni stroj u Hrvatskoj. U to vrijeme u svijetu nije bilo više od dvadesetak zemalja uključeno u proizvodnju alatnih strojeva. Nakon 2.svjetskog rata, na Žitnjaku je izgrađena nova tvornica alatnih strojeva «Prvomajska» koja je postala temelj svih ostalih tvornica koje su se počele razvijati u Hrvatskoj. Tvornica Prvomajska iz Zagreba je prva u Hrvatskoj 1969.godine nabavila numerički upravljanu konzolnu glodalicu. Danas u svijetu imamo samo oko 50 država registriranih da proizvode alatne strojeve, a Hrvatska se na tom popisu nalazi na 29.mjestu. [1]



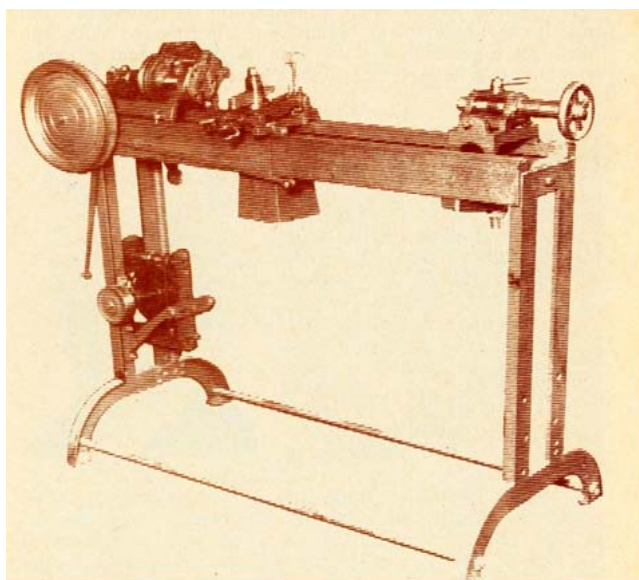
Tvornica «Prvomajska» 1969.g.
Numerički upravljana konzolna glodalica



Prvi NC stroj – M.I.T.
(Massachusetts Institute of Technology)

Slika 1. Prvi NC stroj M.I.T. [2]

Alatni stroj je jedan od najvažnijih elemenata proizvodnog sustava. Nastao je tijekom prve industrijske revolucije, a još se uvijek razvija i unapređuje zahvaljujući novim tehnologijama, elektronici, informatici, te CAD/CAM sustavima.



Tokarilica iz približno 1825.godine



Numerički upravljani alatni stroj

Slika 2. Razvoj alatnih strojeva [3]

Alatni strojevi se prema načinu upravljanja dijele na:

- Ručno upravljane alatne strojeve (strojem upravlja operater)
- Automatski upravljane alatne strojeve (program – geometrijski i tehnološki podaci)

Numerički upravljani alatni stroj spada u grupu automatski upravljanih alatnih strojeva, jer se geometrijski i tehnološki podaci zadaju preko programa koji se upisuje u upravljačku jedinicu alatnog stroja.

Stalnim tehničkim unapređenjima i razvojem automatskih uređaja za izmjenu alata i obradaka, bitno se smanjuju glavna i pomoćna vremena obrade, te se na taj način bitno povećava produktivnost. [3]

2. Nadzor procesa i sustava

Sigurnost i pouzdanost rada industrijskih proizvodnih procesa je veoma važna pretpostavka ekonomske produktivnosti. Iznenadni nastupi procesnih poremećaja kao što su kolizija, preopterećenje, lom, te trošenje alata nisu potpuno razumljivi, a izazivaju ispade proizvodnih sustava. Da bi se spriječili efekti ekscesnog trošenja ili u konačnici lom alata, osobita se pažnja u modernim tehnološkim sustavima posvećuje predviđanju stanja alata.

Glavni parametar koji generira slučajne poremećaje u obradnom sustavu tijekom obrade je proces trošenja reznog alata, koji nastaje kao posljedica interakcija između alata, obratka i uvjeta obrade. Zbog raznolikosti ulaznih parametara, neprestanog stvaranja novih materijala, geometrije i novih alatnih materijala, te viših brzina obrade uz istovremeno postavljanje strožih standarda u pogledu sigurnosti, proces nadgledanja postaje sve složeniji, tako da nadzor procesa postaje jedna od najzahtjevnijih zadaća u daljnjem razvitku obradnih strojeva.

Danas se koriste razmjerno skupi eksterni senzori podržani dodatnom opremom za obradu i prihvrat signala uz odgovarajući sustav ocjene. Dodatnu opremu je potrebno prilagoditi dotičnom stroju i obradnim operacijama. S tehničkog aspekta uspostava veze između eksternih sustava i upravljačkog sustava stroja uvijek je vezana uz stanovite poteškoće, od kojih se mogu istaći:

- potrebni su dodatni uređaji i senzori, te njihovo prilagođavanje stroju
- eksterni sustavi ostvaruju dobre eksploatacijske rezultate tek nakon dobre pripreme
- ne koriste se informacije sadržane u upravljanju
- opsluživanje i parametriziranje sustava nadzora često je zahtjevno i komplicirano

Stoga se okrećemo kombinaciji digitalnih pogonskih signala i internih podataka upravljačkog sustava stroja, koji uz napredne metode analize signala u mnogim slučajevima mogu zamijeniti eksterne sustave nadzora. Integracija softverskog modula procesnog nadgledanja u upravljački sustav stroja omogućava, bez dodatnog hardverskog proširenja, brzu reakciju u slučaju pojave procesnih poremećaja.

Moderni otvoreni upravljački sustavi ostavljaju korisniku mogućnost razvijanja specifičnih funkcija nadzora procesa, te njihovo dodavanje u standardnu biblioteku funkcija. Tako postavljeni softverski moduli pružaju najbrže reakcije u slučaju poznatog procesnog poremećaja. Istrošenost alata ima najveći utjecaj na snagu, odnosno jakost struje glavnog motora. Signal jakosti struje glavnog vretena pokazuje jasan trend rasta u ovisnosti o stupnju istrošenosti alata.

Softverski moduli nadgledanja integrirani u upravljački sustav, nasuprot klasičnim eksternim sustavima nadgledanja, nude ekonomično i jednostavno rješenje. [4]

2.1 Adaptivno vođenje alatnih strojeva

U cilju podizanja kvalitete obradnog procesa u cjelini, kao logična se nadogradnja postojećih CNC sustava upravljanja nameću razvoj i primjena adaptivnih modela vođenja alatnih strojeva. Njihova prednost nad klasičnim oblicima vođenja proizlazi iz mogućnosti adaptacije parametara obrade u realnom vremenu, imajući u vidu željene performanse procesa i njegova ograničenja.

Temeljem dosad predloženih modela adaptivnog vođenja alatnih strojeva može se izvršiti njihova opća kategorizacija u tri skupine:

1. adaptivno vođenje s ograničenjem referentne veličine
2. optimalno adaptivno vođenje
3. adaptivno vođenje prema zahtijevanoj geometriji obratka

Navedeni bi oblik vođenja imao zadatak kontinuirano adaptirati parametre obrade u cilju realizacije, u tehnološkoj pripremi proizvodnje, programiranog vijeka trajanja alata. U slučaju neočekivano visokog stupnja trošenja trebao bi osigurati i siguran završetak započetog prolaza alata ili cijele operacije, odnosno izlaz alata iz zahvata prije loma (*pre-fault tolerance control*). Ovim je ciljevima nužno pridodati još i zahtjeve za povećanjem stupnja produktivnosti i osiguranjem kvalitete obrađene površine, a sve to imajući u vidu neizbježna tehnološka ograničenja obradnog procesa. [5]

Adaptivnim vođenjem alatnih strojeva se:

- povećava produktivnost alata
- povećava produktivnost stroja
- smanjuju troškovi obrade do 40%
- eliminira mogućnost oštećenja alata, obratka i stroja
- optimizira i nadgleda radni vijek alata
- povećava se kvaliteta izradaka

Način rada adaptivnog vođenja alatnih strojeva:

- kontinuirano se mjere stvarni uvjeti obrade (rezanja)
- računa se optimalni posmak za svaku obradu u realnom vremenu
- omogućava se stabilna kontinuirana i automatska kontrola posmaka u procesu obrade [6]

3. Obrada odvajanjem čestica

Obrada odvajanjem čestica je najvažniji industrijski proces pretvorbe materijala. Sam proces rezanja i sva zbivanja koja se odvijaju na sučelju obradak – alat – stroj nazivaju se obradom odvajanjem čestica. Obrada materijala odvajanjem čestica predstavlja dio obradnih, tehnoloških i proizvodnih sustava koji se ograničava na fizički proces odvajanja materijala i na razne alate. Obradni sustav predstavlja jedan ili grupu alatnih strojeva na kojima se ostvaruju određene operacije obrade pomoću kojih se vrši transformacija iz sirovca u gotovi proizvod.

Velik dio metalnih dijelova raznih strojeva, aparata i konstrukcija dobiva svoj konačni oblik, tražene dimenzije i odgovarajuću kvalitetu obrađene površine kao rezultat skidanja sloja materijala nekim od postupaka obrade odvajanjem čestica s različitim alatima na različitim alatnim strojevima. Odvojeni djelići materijala vrlo su maleni u odnosu na veličinu obratka i takvog su oblika da se više ne mogu direktno upotrijebiti za daljnju obradu. Nekada su se smatrali otpadnim materijalom no danas se u većini slučajeva odvojena čestica sakuplja, pere, suši i daje na recikliranje. [7]

Obrada materijala odvajanjem čestica danas ima vrlo veliko značenje kako po broju samih postupaka tako i po njihovoj raznovrsnosti u primjeni, jer se tim postupcima, iako ponekad nisu najekonomičniji, mogu postići najveće točnosti i najbolja kvaliteta obrađene površine.

Alati u užem smislu predstavljaju sredstva kojima se obrađuje materijal i pomoću njih se s materijala odvajaju čestice u toku obrade. Osnovni oblik oštrice reznog alata je oblik klina. Pravilnim oblikovanjem alata te pravilnim izborom alatnog materijala mogu se postići značajne uštede i sniženje proizvodnih troškova jer troškovi alata značajno utječu na troškove ukupne proizvodnje nekog proizvoda.

Tri glavna faktora vezana su uz proces obrade odvajanjem čestica:

1. obradak
2. alat
3. alatni stroj

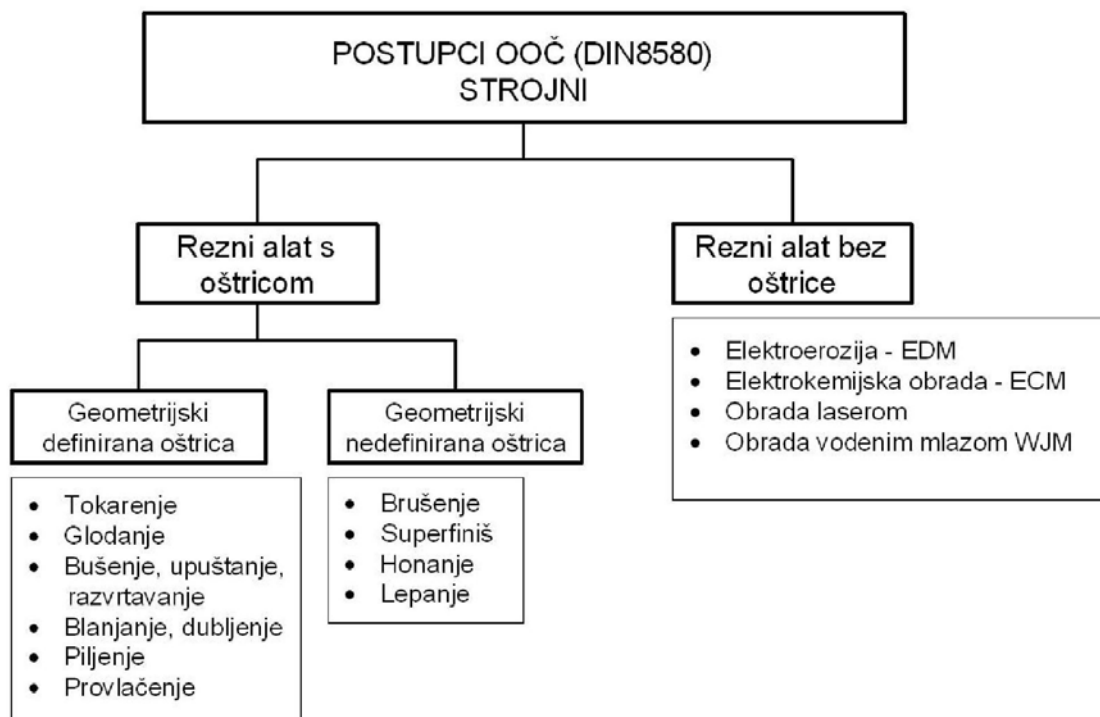
Osnovna podjela (strojnih) postupaka obrade odvajanjem čestica je na postupke kod kojih se koriste:

- A) alati s reznom oštricom
- B) alatima bez oštrice.

Kod postupaka obrade alatom sa reznom oštricom, oštrica može biti geometrijski definirana ili pak geometrijski nedefinirana. Na taj način dijele se i sami postupci.

U postupke obrade odvajanjem čestica reznim alatom s geometrijski određenom oštricom spadaju tokarenje, glodanje, bušenje, upuštanje, razvrtanje, blanjanje, dubljenje, piljenje, provlačenje, a u postupke reznim alatom nedefinirane oštrice spadaju brušenje, superfiniš, honanje i lepanje.

Kod alata bez oštrice radi se o obradi odnošenjem i tu uglavnom spadaju nekonvencionalni postupci kao što su: elektroerozija - EDM, elektrokemijska obrada – ECM, obrada laserom i obrada vodenim mlazom. [8]



Slika 3. Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [9]

U praksi se događa da se uz pronalazak ma kako čvrstog i tvrdog konstrukcijskog materijala uvijek javlja potreba za drugim, još tvrdim alatnim materijalom. To jest ujedno i osnovni preduvjet za daljnji razvoj tehnike obrade odvajanjem čestica jer će se tehnika obrade odvajanjem čestica razvijati uspješno samo onda, ako pronalazak novih alatnih materijala i izrada samih alata budu tekli ispred razvitka novih i poboljšanih konstrukcijskih materijala.

To znači da će svaki pojedini poboljšani segment tehnologije obrade odvajanjem čestica kao cjeline generirati i pokrenuti cijeli niz daljnjih poboljšavanja fizičko-mehaničkih i eksploatacijskih svojstava konstrukcijskih materijala uz naravno dodatne pogodnosti s primjerice proizvodnog, ekonomskog i ekološkog aspekta. Samim time doći će i do usavršavanja posebno važnog sučelja, a to je ono između alata i samog obratka.

U dalekoj prošlosti alati su prvenstveno bili sredstva za rad koje se drži u ruci, a služili su za obradu materijala. Danas se pod pojmom alat krije uistinu širok spektar raznih sredstava koji omogućuju uspješno transformiranje materijala, tj. sirovca u gotove proizvode ili pak cijeli niz sredstava koji svakodnevno služe na raznim poljima čovjekova života i djelovanja poput medicine, strojarstva, informatike, elektrotehnike itd. U obradi odvajanjem čestica alati u užem smislu predstavljaju sredstva kojima se vrši obrada materijala i kojima se u toku produkcije odvajaju čestice s obratka. [7]

Na sljedećoj slici su prikazani materijali za izradu alata i njihove karakteristike (žilavost i čvrstoća u odnosu na otpornost na trošenje i brzinu rezanja).

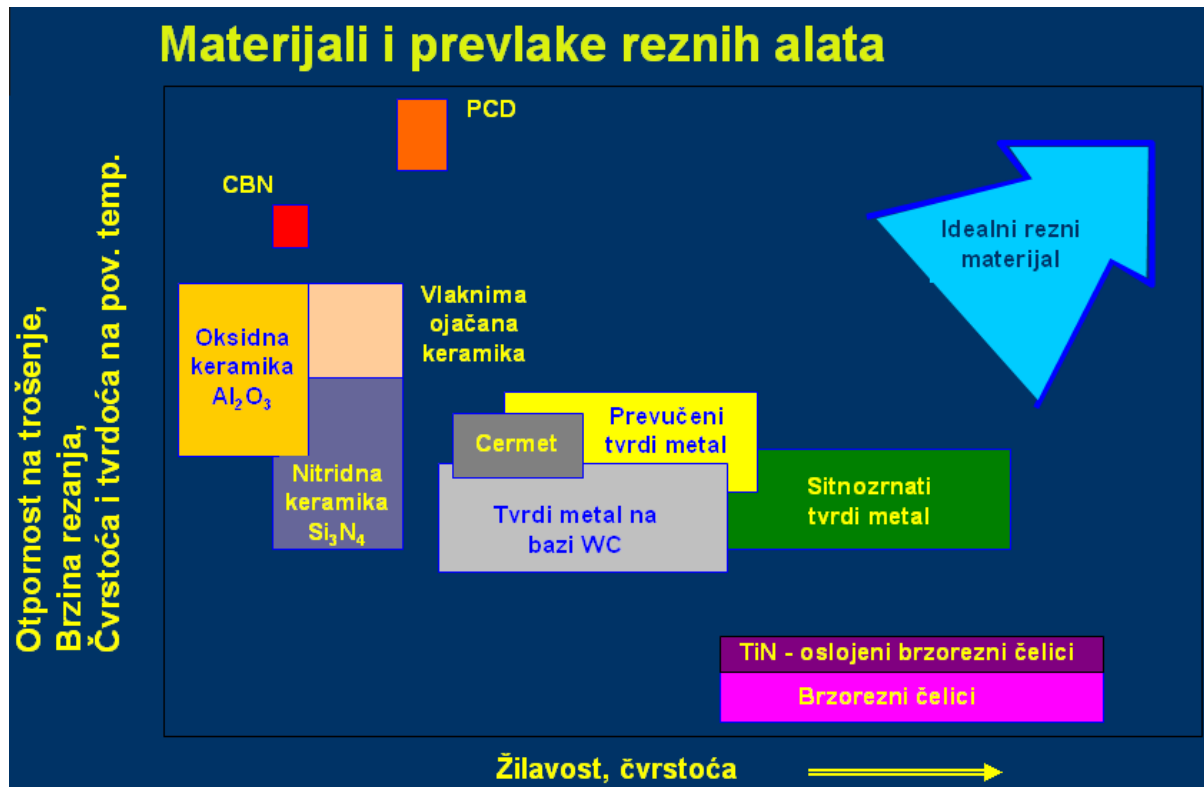
Materijali za izradu alata su:

- brzorezni čelici
- tvrdi metali
- cermet
- nitridna keramika
- oksidna keramika
- CBN - kubični bornitrid
- PCD – polikristalni dijamant [10]

Prevlačenje je postupak stvaranja novog površinskog sloja s ciljem povećanja otpornosti na trošenje i otpornosti na koroziju.

Najpoznatija su prevlačenja u parnoj fazi:

- CVD (Chemical vapour deposition) : TiN, TiC, Al_2O_3
- PVD (Physical vapour deposition) : TiN, TiCN, oksidi
- PACVD (Plasma assisted CVD) : karbidi, nitridi, oksidi, dijamant i dijamantu slični spojevi (DLC) [10]



Slika 4. Materijali i prevlake reznih alata [11]

Zadatak svakog alata za obradu odvajanjem čestica jest da ispuni dva osnovna uvjeta:

1. skinuti određeni sloj materijala s obratka uz nastojanje da skine što veću količinu u jedinici vremena,
2. osigurati potrebne dimenzije i odgovarajuću geometriju obratka, ali uz traženu kvalitetu obrađene površine i minimalne troškove obrade.

Zadaća alatnih strojeva je da ostvare slijedeće zahtjeve:

- sigurno međusobno gibanje obratka i alata u cilju obavljanja radnje odvajanja čestice materijala,
- da za vrijeme obrade stalno osiguravaju pravilan relativni odnos gibanja obratka i alata, na osnovu postavljenih tehnoloških zahtjeva u pogledu točnosti izrade i kvalitete površine,
- da izdrže djelovanje sila rezanja koje se kao aktivne stvaraju prilikom obrade odvajanjem čestica između oštrice alata i obratka.

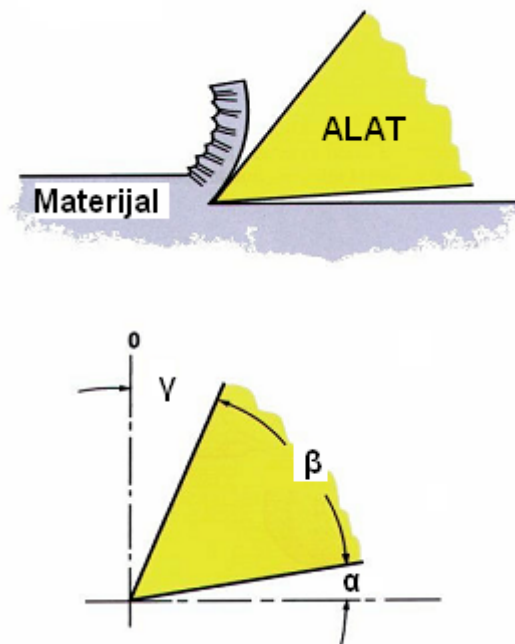
Zbog velike dodane vrijednosti finalnom proizvodu skup procesa obrade odvajanjem čestica je najvažniji od svih osnovnih procesa proizvodnje. Može se isto reći da je obrada odvajanjem čestica najčešće primijenjena i najskuplja obrada. Glavnina industrijske primjene obrade odvajanjem čestica je u metalima ali se sa zahtjevima tržišta također raširila i na druge materijale.

Materijali, za čiju su obradu potrebne velike sile rezanja, zahtijevaju i snažne alate. Kod ovih postupaka obrade odvojena čestica se plastično deformira, savija i odvaja od izratka. Geometrija alata je dizajnirana na taj način da je dobivena obrađena površina što je moguće manje plastično deformirana. Obrada kod koje je glavna karakteristika odstranjivanje "viška" materijala se naziva gruba obrada. Ako je primarna namjera izrada finih površina s točnim mjerama obratka onda se naziva fina obrada. [7]

Proces odvajanja čestica shematski je prikazan na sljedećoj slici.

Geometrija reznih dijelova:

- stražnji ili slobodni kut α – naziva se kut između stražnje površine i ravnine rezanja
- prednji kut γ – naziva se kut između prednje površine i ravnine, okomite na ravninu rezanja, postavljenu kroz glavnu rezu oštricu
- kut klina β - mjeri se između prednje i stražnje površine [12]



Slika 5. Proces odvajanja čestice [12]

Da bi iz sirovog materijala dobili koristan proizvod potrebna je odvojena čestica koja je definirana kinematikom i gibanjima samog stroja, prema kojima se određuju parametri obrade. Bez definiranih gibanja nije moguće ostvariti obradu odvajanjem.

Gibanja su podijeljena na:

a) GLAVNO GIBANJE (G) – izvodi se brzinom v_C (brzina rezanja), i njome se obavlja odvajanje čestice, pri čemu se troši najveći dio snage na alatnom stroju.

Po obliku glavno gibanje može biti:

- kružno ili pravocrtno
- kontinuirani ili diskontinuirano

b) POSMIČNO GIBANJE (P) – izvodi se brzinom v_f (posmična brzina) i služi za održavanje kontakta između alata i obratka.

Po obliku posmično gibanje može biti:

- kružno ili pravocrtno
- kontinuirano ili diskontinuirano

c) DOSTAVNO GIBANJE (D) – primak-odmak; potrebno je za dovođenje alata i obratka u zahvat, zauzimanje dubine rezanja, te povrat nakon obavljene obrade. [13]

Prednosti obrade odvajanjem česticama:

- jedini način da se ostvari visoka preciznost i visoka kvaliteta obrađene površine
- jedini način formiranja oštih rubova, ravnih površina, te unutarnjih i vanjskih profila
- jedini način oblikovanja otvrdnutih i krutih materijala
- ekonomičnost (za male serije, tj. prototipove)
- presudna je kod formiranja složenih oblika s zahtjevnom dimenzijskom točnošću i površinskom hrapavošću

Nedostaci obrade odvajanjem čestica:

- generiraju se velike količine odvojenih čestica
- više vremena se troši za obradu nego za formiranje površina
- u slučaju lošeg projektiranja obrade odvajanjem može doći do narušavanja svojstva obratka i obrađene površine [13]

3.1 Bušenje

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica kod kojeg glavno, rotacijsko gibanje i posmično, translacijsko gibanje vrši alat. Pojavljuje se kao vrlo česta, a i dugotrajna operacija kod koje alat kružnim kretanjem pod pritiskom prodire u materijal obratka te odvaja sloj materijala određene debljine da bi se postigao traženi promjer i kvaliteta površine obratka.

Već u kameno doba ljudi su bušili pomoćne alate kao što su sjekire od kamena da bi mogli na njih nasaditi drške. Sami početak razvoja svrdla počinje 1780. godine u Engleskoj. U samom početku zastupljena je primjena u obradi drva, a kasnije i kod obrade metala. Dugi niz godina metali su se bušili jednostavnim kovačkim svrdlom, koja su zamijenjena vijčanim svrdlima. Nedugo zatim slijede nova otkrića; 1790.-1800. godine zabilježeno je da su slični alati proizvedeni u Augsburgu, zatim je 1860. godine Giovanni Martignoni izumio dvostruko svrdlo u Njemačkoj. Spiralno svrdlo izmislio je Steven A Morse iz Massachusettsa 1861.godine, te je od tog vremena pa do danas razvoj bušenja bio popraćen razvojem industrije i potrebom tržišta.

Pri bušenju provrta s većim promjerom treba prvo predbušiti kako bi se smanjila aksijalna sila bušenja. Veličina svrdla kojim se izvršava predbušenje iznosi oko 50 % veličine nazivnog svrdla. Ukoliko je potrebno bušiti manji broj provrta, ili se radi u manjim serijama, bušenje se obično izvodi stolnom, stupnom ili radijalnom bušilicom. Kod većeg broja provrta, velikih serija s više provrta te sa zahtjevima u pogledu njihovih međusobnih razmaka primjenjuje se viševretno bušenje. Bušenje se također može obavljati na tokarskim strojevima, no u tom slučaju glavno gibanje (rotaciju) obavlja obradak, dok posmično kretanje obavlja alat. Provrti koji su izbušeni uglavnom ne zadovoljavaju uvjete kvalitete i preciznosti, pa se zbog većih točnosti moraju upotrebljavati razvrtala raznih oblika. Bušenje omogućuje dobivanje provrta i cilindričnih otvora u punom metalu, u poljima kvalitete od IT 6 do IT 16.

Alat za obradu bušenjem jest svrdlo, a ovim postupkom se u materijalu izrađuju prolazni i neprolazni provrti. Uz bušenje postoje također i drugi postupci kojima se mogu izraditi provrti (npr. štancanje, tokarenje, probijanje, lijevanje, autogeno rezanje, ...). Prednost bušenja jest u tome da je postupak primjenjiv za gotovo sve materijale, moguće ga je primijeniti i kod raznovrsnih oblika geometrije obradaka,

pogodan je za ostvarivanje sve strožih tolerancija i specifičnih kvaliteta obrađenih površina te je primjenjiv i kod različitih veličina serije proizvoda. Sve to daje postupku bušenja presudnu važnost u postupku odabira tehnologije obrade.

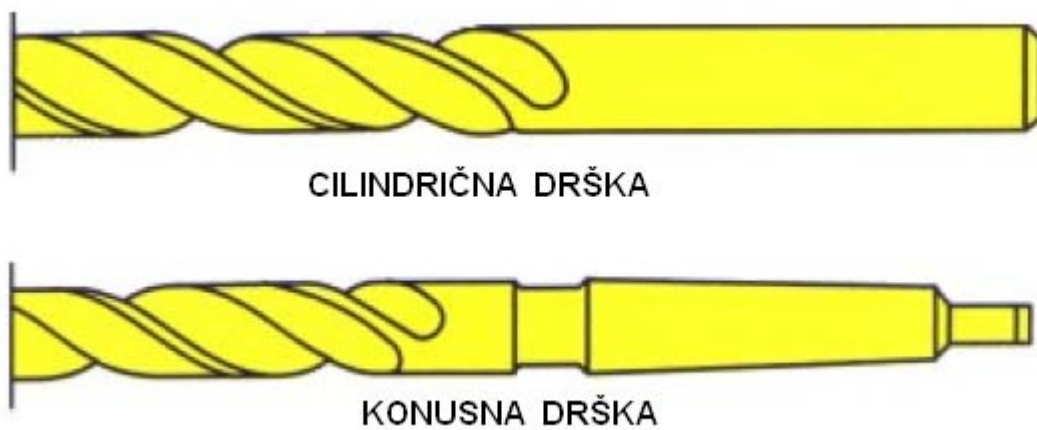
Kontinuirani razvoj industrije, znanstvenih metoda te udovoljavanje specifičnim potrebama tržišta doveli su do takovog razvoja postupka bušenja, alata za bušenje i prateće opreme da danas praktički nema ograničenja u pogledu obrade raznovrsnih konstrukcijskih materijala, naročito onih s visokom tvrdoćom te različitih i zahtjevnijih oblika geometrije obradaka. [7]

3.2 Alati za bušenje - svrdla

Svrdla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih dubina u raznim materijalima. Najlakše podjele svrdla su prema njihovoj geometriji, i to najčešće prema obliku drške (slika 6). Postoje svrdla s cilindričnom i konusnom drškom.

Svrdla mogu biti podijeljena na:

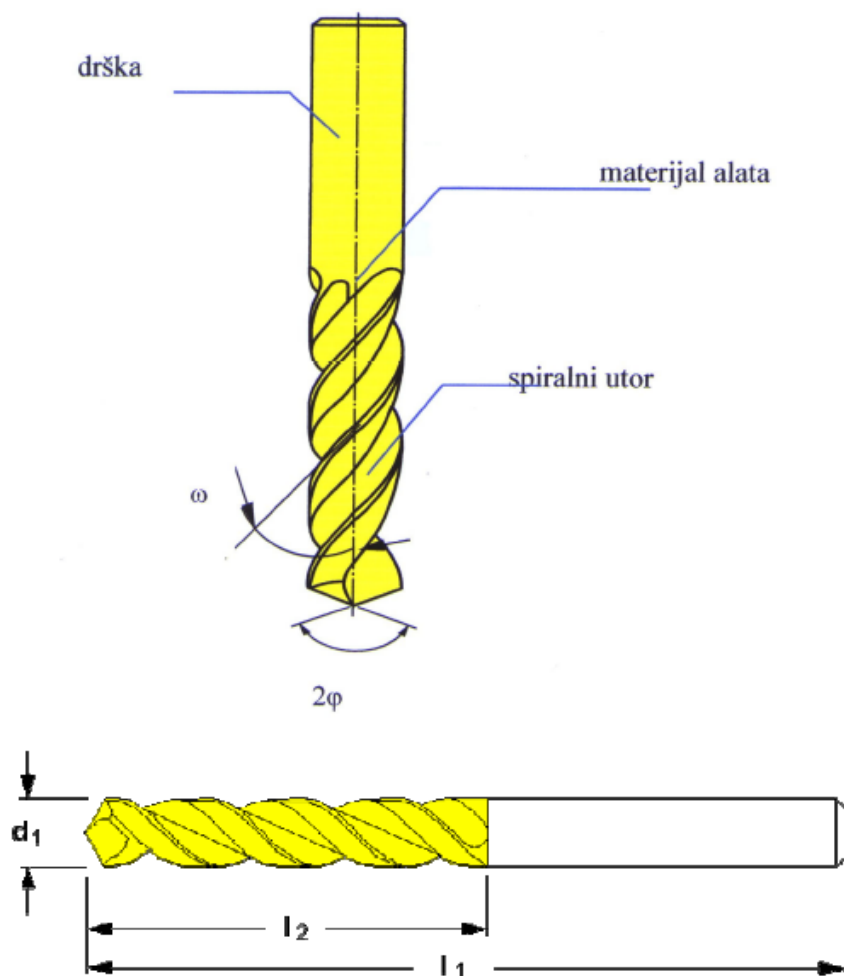
- spiralna svrdla,
- svrdla s pločicama od tvrdog metala,
- ravna svrdla,
- zabušivala,
- specijalne izvedbe spiralnih svrdala i
- noževe i motke za bušenje



Slika 6. Podjela svrdla prema geometriji [12]

Spiralno svrdlo (slika 7) se sastoji od:

- radne dužine svrdla (l_2), koja sadrži spiralne utore, a uključuje u sebi rezni dio i kalibrirajući dio svrdla
- usmjeravajućeg dijela, dio svrdla koji osigurava usmjeravanje svrdla u procesu rezanja
- drška, dio svrdla koji služi za pričvršćivanje svrdla i za prijenos okretnog momenta sa alatnog stroja [12]



Slika 7. Spiralno svrdlo [12]

Dužina radnog dijela svrdla l_2 , (slika 7) određuje se prema potrebi dubine bušenja i skraćivanja svrdla pri bušenju. Dužina radnog dijela svrdla l_2 ne smije biti manja od:

$$l_2 = l_a + 3 \cdot d_1 \quad (3.1)$$

gdje je:

l_a = dubina bušenja

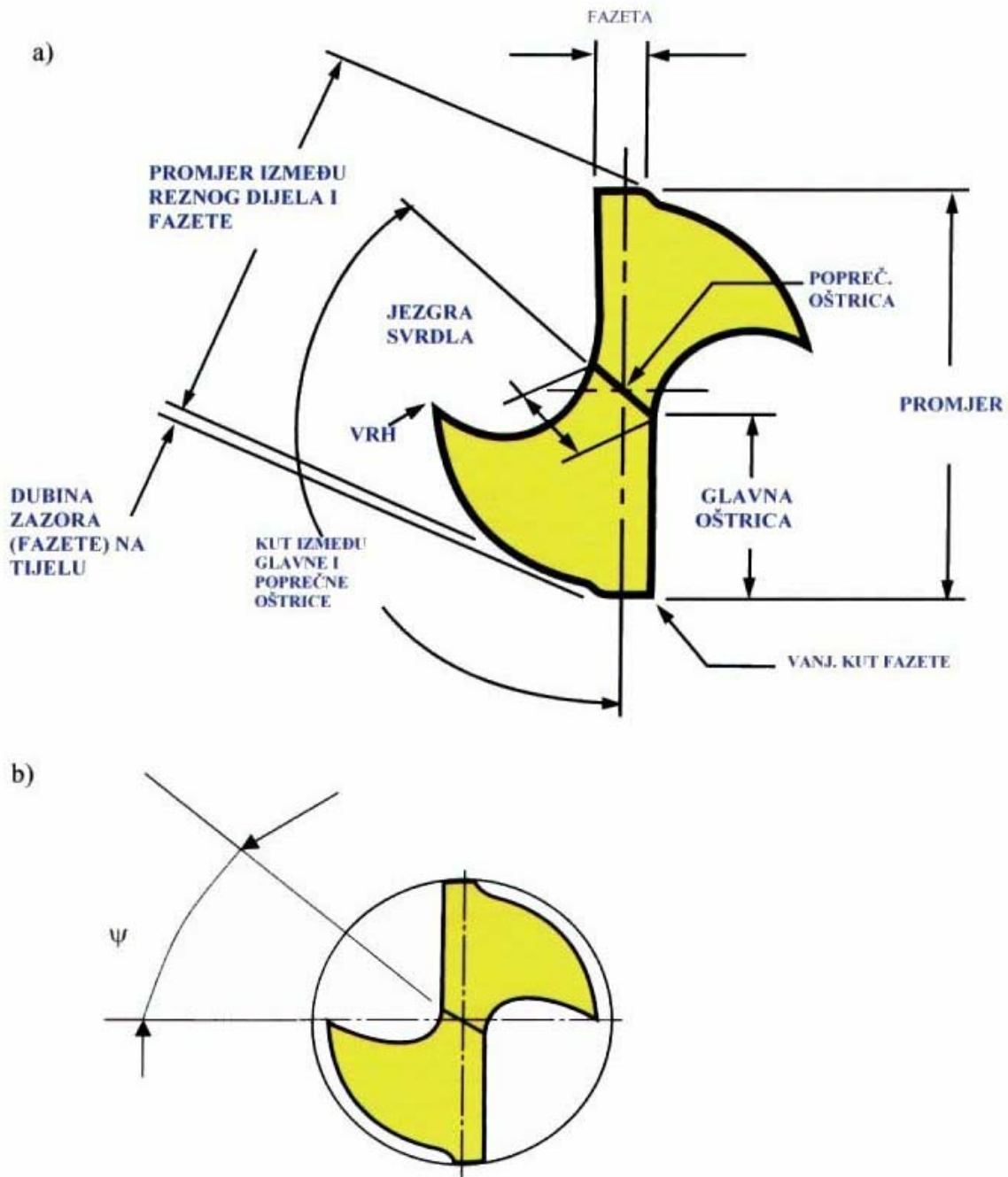
l_1 = ukupna duljina svrdla

l_2 = duljina radnog dijela svrdla

d_1 = promjer svrdla [12]

Svrdlo je alat koji ima dvije glavne (rezne oštrice) i jednu poprečnu oštricu.

Na slici 8. prikazane su oštrice i kutovi spiralnog svrdla.



Slika 8. Presjek spiralnog svrdla [14]

Osnovni elementi spiralnog svrdla su slijedeći:

- Prednja površina - je zavojna površina utora po kojoj klizi odvojena čestica
- Stražnja površina - je površina okrenuta prema površini rezanja
- Glavna oštrica - nastaje presjekom konvolutne zavojne plohe i stražnje površine koja je dio plohe stošca

- Poprečna oštrica - nastaje presjekom ploha dvaju stožaca čiji su vrhovi na suprotnim stranama, tj. to je linija koja se dobije presijecanjem dviju stražnjih površina. Poprečna oštrica čini 15% ukupne dužine oštrice, a na njoj djeluje do 65% aksijalne sile (zavisno o promjeru svrdla). Kut na poprečnoj oštrici je negativan i kreće se od 48° - 55° (tu dolazi do trganja i izbacivanja materijala). Skraćenjem poprečne oštrice poboljšavaju se uvjeti rezanja.
- Kut vrha svrdla 2ϕ - je kut što ga zatvaraju dvije glavne rezne oštrice. Ovaj kut odabire se prema materijalu koji obrađujemo. S povećanjem kuta 2ϕ povećava se i otpor rezanja, a samim tim su i veća naprezanje svrdla na uvijanje i izvijanje. Kod tvrdih materijala on iznosi: $2\phi = 120^\circ$ - 140° , a kod mekših materijala (npr. Al i Cu legure) je $2\phi = 80^\circ$ - 110° .
- Kut zavojnice utora ω - je kut između osi svrdla i razvijenog brida utora. Ovaj kut određuje veličinu prednjeg geometrijskog kuta. Povećavanjem kuta zavojnice ω povećava se kut, ujedno se popravljaju uvjeti rezanja, smanjuje moment uvijanja i otpori rezanja. Istovremeno se smanjuje krutost svrdla i trajnost oštrice, pogotovo za svrdla manjeg promjera.



Slika 9. Svrdla s različitim kutom zavojnice utora ω [14]

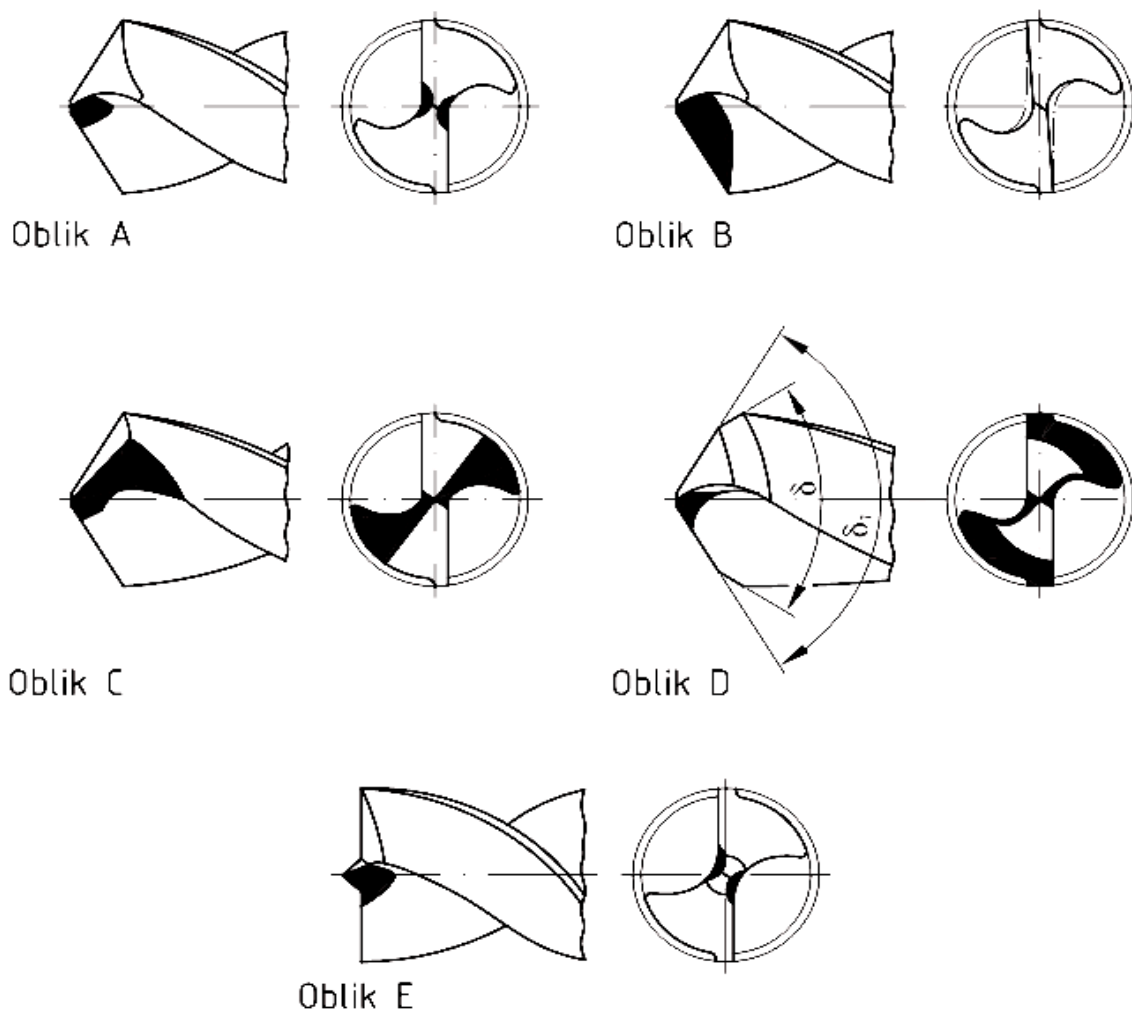
Korak zavojnice se računa prema izrazu :

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{d \cdot \pi}{h} \quad (3.2)$$

Ovaj kut se bira prema materijalu obratka. Normalni kut zavojnice utora je 30° , dok se za tvrde materijale on uzima približno 40° , a za plastične materijale 13° .

Kut poprečne oštrice ψ - je kut što ga zatvara poprečna oštrica s ravninom, koja prolazi glavnom oštricom paralelno sa smjerom osi svrdla. Ovaj je kut mjerodavan da se utvrdi, da li podbrušene površine imaju traženi oblik, a podbrušeni kutovi ispravne vrijednosti. Kut poprečne oštrice daje veću silu posmaka što sve skupa dovodi do većeg utroška snage.

VRSTE BRUŠENJA VRHA SVRDLA PREMA DIN 1412



Slika 10. Podjela svrdla prema geometriji oštrice [15]

Podjela svrdla prema geometriji oštrice:

Navedena svrdla s obzirom na geometriju oštrice imaju različite rezultate djelovanja prilikom bušenja:

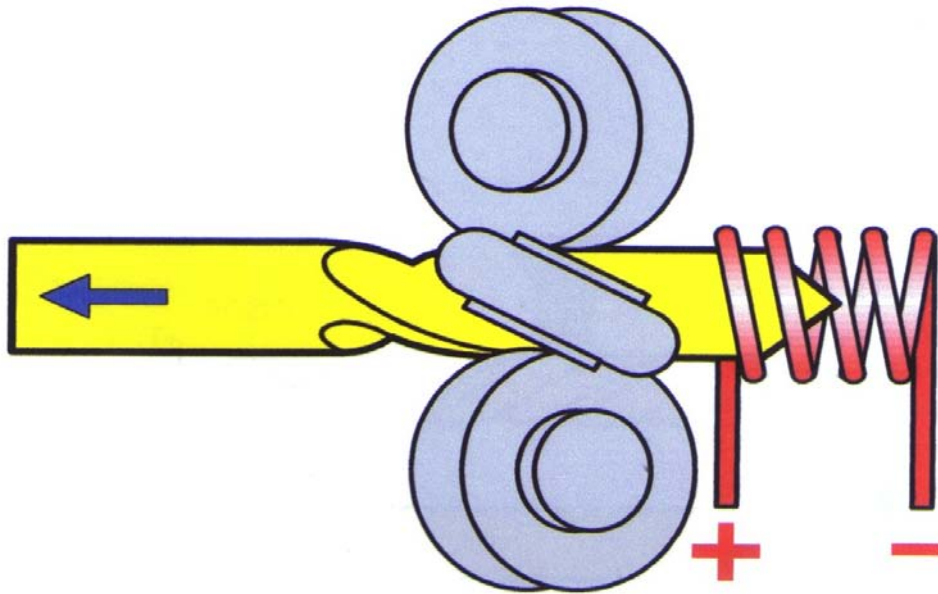
- svrdla oblika A i C neznatno povećavaju silu rezanja
- svrdlo oblika B omogućuje stabilizaciju glavne oštrice
- svrdlo oblika D ima jednostruko lomljenu oštricu što ima za cilj smanjenje presjeka odvojene čestice te se smanjuje mehaničko i toplinsko opterećenje oštrice
- svrdlo oblika E ima zašiljeni vrh što mu omogućuje centriranje rupe, odnosno olakšan ulaz svrdla u materijal (manje vibracije) čime je vođenje svrdla bolje, a kvaliteta površine veća
- postoji još i svrdlo oblika U koje također ima neznatan utjecaj na povećanje sile rezanja

3.3 Izrada svrdla

Svrdla za bušenje mogu se izrađivati na nekoliko načina:

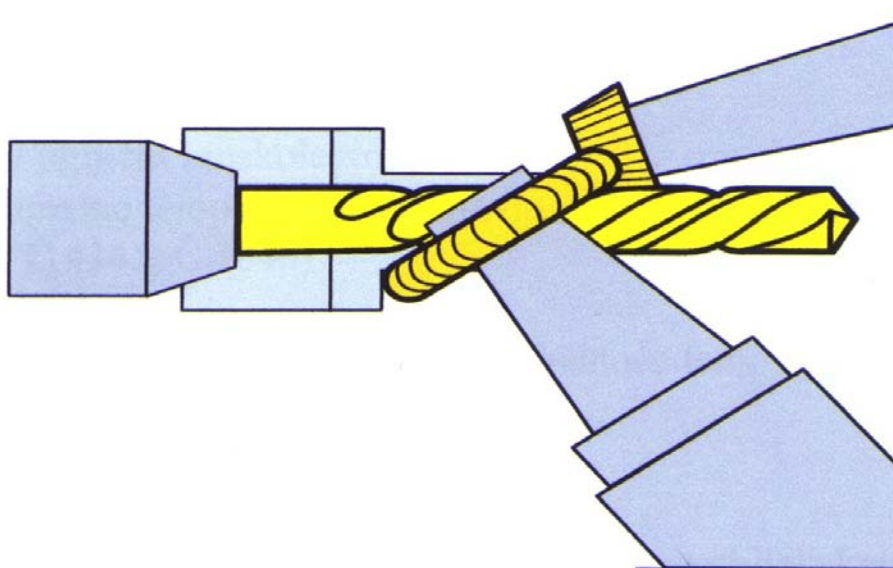
1. valjanjem
2. glodanjem
3. brušenjem

1. Valjanje se radi kalibriranim valjcima, koji utiskuju utoke u zagrijanu šipku. Svrdlo se zakreće prema odgovarajućem kutu spiralnog svrdla. Ova svrdla imaju povoljnu strukturu jer su im kristali razmješteni duž utora pa su vrlo otporna na trošenje.



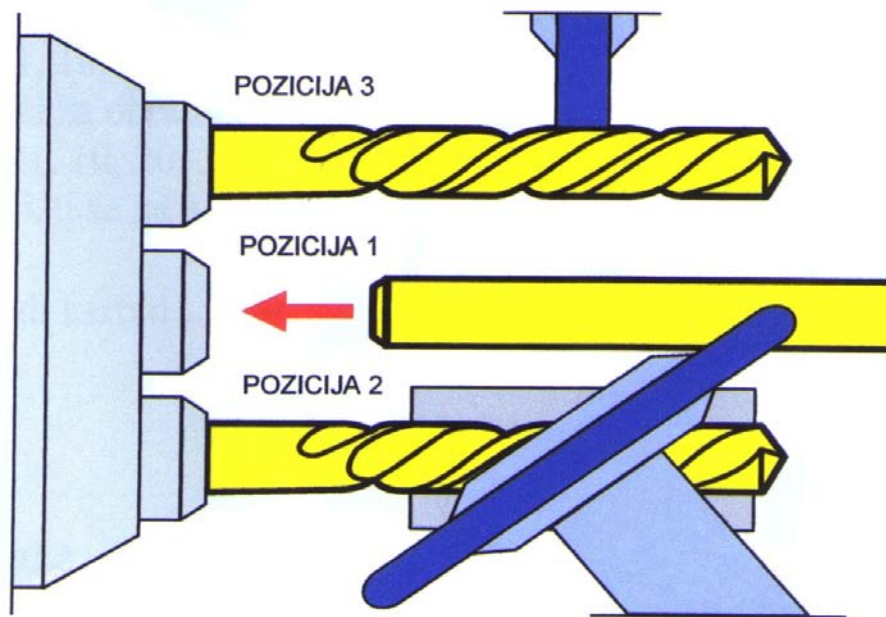
Slika 11. Izrada svrdla valjanjem [14]

2. Glodanje svrdla vrši se pomoću profilnog glodala uz postepeno okretanje i pomicanje šipke. Struktura nije tako povoljna kao kod izrade valjanjem jer je struktura vlakna isprekidana glodanjem. Prednost tih svrdla nad valjanim je puno veća točnost.



Slika 12. Izrada svrdla glodanjem [14]

3. Brušenjem se izrađuju najkvalitetnija svrdla. Kod kaljenja pune šipke spriječena je akumulacija topline i krhkosti na oštricama, što je pojava kod valjanih i glodanih svrdla. Izbjegnuto je i eventualno iskrivljenje, opuštanje, ravanje i smanjenje tvrdoće već gotovog svrdla.



Slika 13. Izrada svrdla brušenjem [14]

Brušena svrdla posjeduju visoku kvalitetu obrađene površine, pa se odvojena čestica lakše odstranjuje, jer je smanjeno trenje odvojene čestice i spiralnih utora svrdla. To omogućuje primjenu veće brzine rezanja i stvaranje manje topline.

3.4 Materijali i prevlake za izradu svrdla

Svrdla se izrađuju od sljedećih materijala:

- alatni ugljični i niskolegirani čelici, maksimalne temperature rezanja do 250°C i brzine rezanja do 20 m/min (Č1940, Č4145, Č3840)
- brzorezni čelici (engl. HSS – High Speed Steel), (Č6880, Č6981), podnose temperature rezanja do 600°C i brzine rezanja 60-70 m/min
- rezna keramika, deset puta kraće vrijeme obrade; postoji crna i bijela keramika za izradu reznih pločica (bijela keramika $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZnO}_2$, crna keramika $\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{WC}+\text{TiC}+\text{TiN})$, podnosi temperature 1300-1400°C i pri temperaturi 1000°C ima veću tvrdoću nego tvrdi metal pri 20°C, brzine rezanja su u praksi 600 m/min, dok je teoretski moguća brzina 1200 m/min, postojanost alata je vrlo velika
- umjetni dijamant, upotrebljava se za alate s definiranom geometrijom
- kubični borov nitrid, temperature rezanja su mu do 1400°C, te postiže vrlo velike brzine rezanja
- tvrdi metal: K 01, 10, 20... - sastoji se od volframovih karbida ($\text{Wc}+\text{Co}$) i kobaltova veziva, služe za obradu ljevova, tvrdih ljevova i tvrdih kaljenih materijala; P 01, 10, 20, 30...-($\text{WC}+\text{TiC}+\text{Co}$) služi za obradu čelika; M 01, 10, 20, 30..($\text{WC}+\text{TiC}+\text{TaC}+\text{Co}$) koristi se za najteže obradive materijale (Č4571, INOX 18/10)
- tvrdi karbid

Danas se uvelike primjenjuju prevlake svrdla od nekih drugih materijala koji poboljšavaju svojstva svrdla, a neke od prevlaka su:

- Crni oksid je jeftinija prevlaka koja poboljšava toplinsku otpornost, podmazivost, kao i rezistenciju na koroziju svrdla izrađenog od brzoreznog čelika. To rezultira većom postojanošću svrdla
- Titan-nitrid (TiN) je tvrd, keramički materijal (2100-2500 HV) kojim se uobičajeno oblaže spiralno svrdlo i produžuje vijek bušenja tri ili više puta.
- Titan-karbon-nitrid (TiCN) tvrdoće od 3000 do 4000 HV je također dvoslojna prevlaka koja produžuje vijek trajanja alata i do nekoliko puta.

- Titan-aluminij-nitrid (TiAlN) modificirana dvoslojna prevlaka koja produžuje vijek trajanja reznog alata pet ili više puta te je u usporedbi sa navedenima bolji izbor i po svojoj tvrdoći na sobnoj temperaturi 3000-3500 HV i otpornosti oksidaciji (800°C)

3.5 Geometrijski parametri odvojenog sloja kod bušenja

Parametri odvojene čestice su važni za projektiranje tehnologije, alata pa i samog alatnog stroja. Pri konstruiranju alata vrlo je važna krutost jer o njoj ovise deformacija, točnost, vibracije, itd. Odvojena čestica može biti lomljena, lamelarna i kontinuirana. Kod bušenja se odvojena čestica odvodi kroz utore (žljebove) za odvođenje odvojene čestice.

Širina odvojene čestice kod bušenja:

$$b = D \frac{1}{2 \sin \varphi} \quad (3.3)$$

Debljina odvojene čestice «h» koju skida svaka oštrica spiralnog svrdla:

$$h = f_z \sin \varphi \quad (3.4)$$

Površina poprečnog presjeka koju skine jedna oštrica:

$$A_1 = b \cdot h = \frac{D \cdot f}{4} \quad (3.5)$$

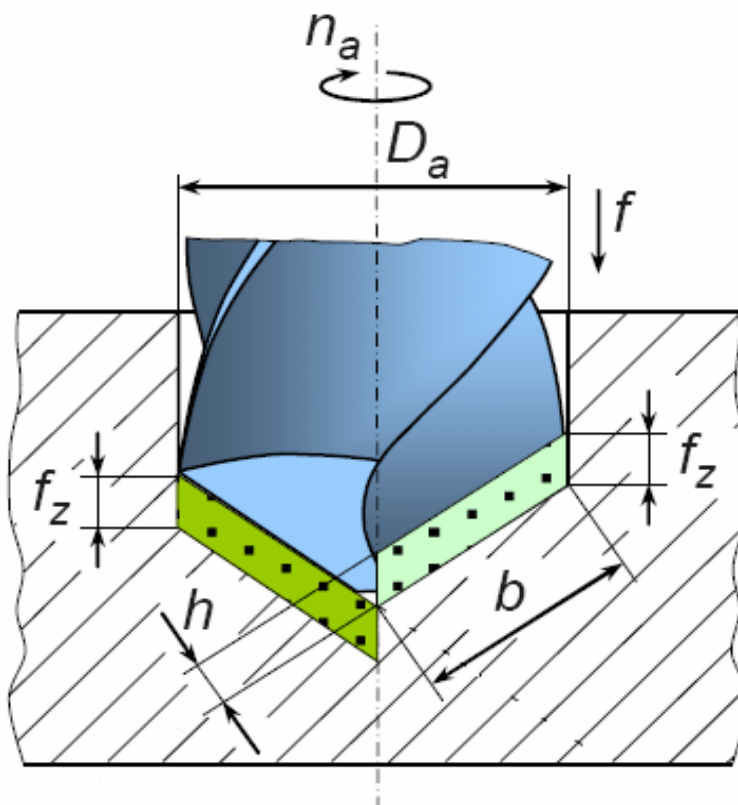
Posmak «f» je put koji obavi svrdlo u pravcu osi alata za jedan okretaj alata.

$$f = f_z \cdot z \quad (3.6)$$

Gdje je:

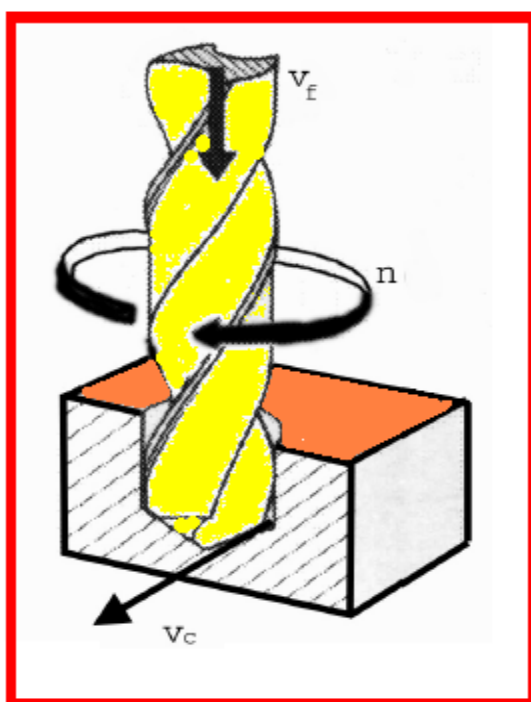
f_z - posmak za jednu oštricu

z - broj oštrica (za svrdlo $z=2$)



Slika 14. Parametri odvojene čestice kod bušenja [12]

3.6 Elementi režima obrade kod bušenja



Slika 15. Shematski prikaz bušenja spiralnim svrdlom [9]

v_c = brzina rezanja (obodna brzina)

n = broj okretaja svrdla

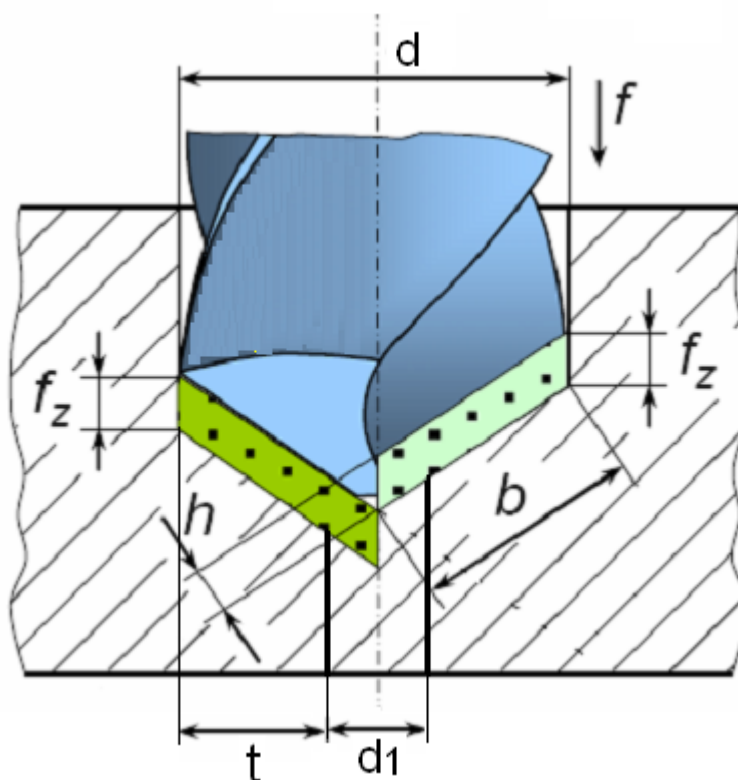
v_f = posmična brzina

Posmična brzina v_f ili posmak u jedinici vremena računa se iz poznatog posmaka broja okretaja svrdla:

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad (3.7)$$

Dubinom rezanja se podrazumijeva udaljenost od obrađivane površine do osi svrdla:[12]

Dubina rezanja: $t = \frac{d}{2} \quad (3.8)$



Slika 16. Prikaz presjeka odvojene čestice po jednoj oštrici za predbušenu rupu [12]

Slika 16 prikazuje bušenje većim svrdlom prije kojega je napravljeno predbušenje . U tom slučaju je dubina rezanja određena izrazom:

$$t = \frac{d - d_1}{2} \quad (3.9)$$

gdje je:

d = promjer svrdla

d_1 = promjer predbušene rupe

Kod bušenja provrta s većim promjerom treba prvo predbušiti kako bi se smanjila aksijalna sila bušenja. Veličina svrdla kojim predbušimo iznosi oko 50 % veličine nazivnog svrdla. Kod bušenja dubokih provrta potrebno je, zbog otežanog odvođenja odvojene čestice i smanjene krutosti svrdla s povećanjem dubine bušenja, smanjiti posmak. Osim toga potrebno je kod dubokih provrta povremeno izvlačiti svrdlo radi čišćenja njegovih utora tj. radi izbacivanja odvojene čestice. Izbor posmaka se uglavnom vrši s obzirom na otpornost elemenata mehanizama za posmično gibanje, s obzirom na stabilnost sustava alat - alatni stroj – obradak i kad je u pitanju obrada veće dubine, s obzirom na mogućnost odvođenja odvojene čestice. Navedeni mogući kriteriji za izbor veličine posmaka pri bušenju spiralnim svrdlom ujedno su i faktori koji ograničavaju njegovu veličinu. [12]

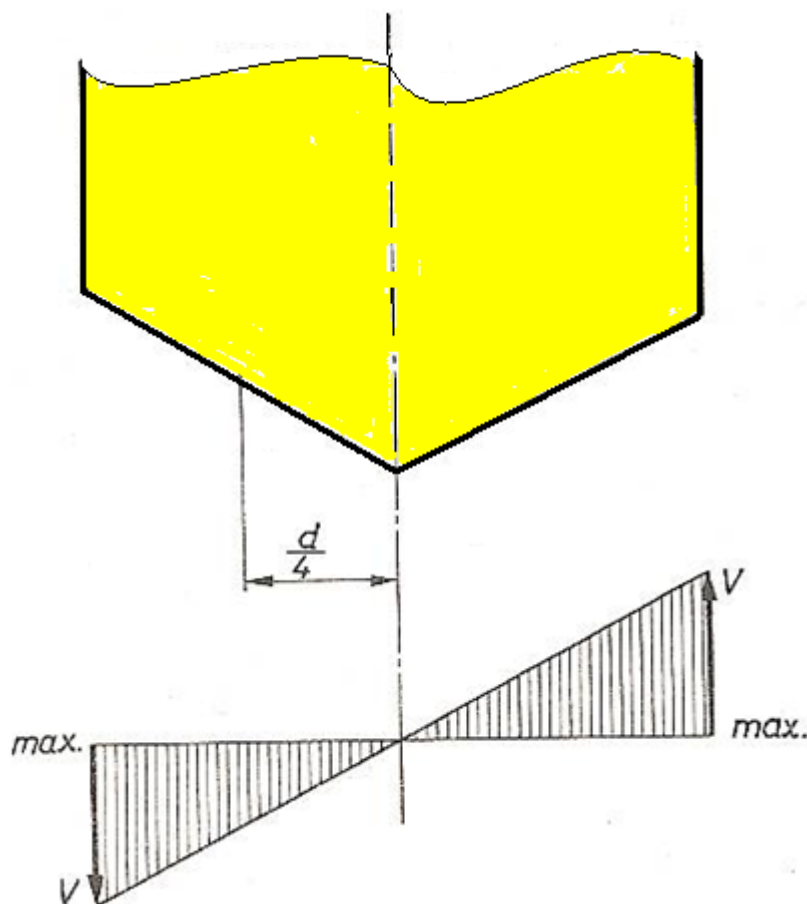
Brzina rezanja « v_c » računa se prema izrazu:

$$v_c = d \cdot \pi \cdot n \quad (3.10)$$

Srednja brzina je brzina na radijusu $\frac{d}{4}$:

$$v_m = \frac{v}{2} = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{2} \quad (3.11)$$

Kao što je prikazano na sljedećoj slici, brzina rezanja je različita u pojedinim točkama oštrice svrdla. U osi svrdla brzina je jednaka nuli, a na obodu je brzina maksimalna. Kao brzina rezanja uvijek se uzima maksimalna brzina, jer ona određuje vijek trajanja svrdla.



Slika 17. Prikaz raspodjele brzine rezanja po oštrici svrdla [12]

Prošireni zakon za brzinu rezanja pri bušenju, koji obuhvaća sve glavne faktore obrade daje se u sljedećem obliku:

$$v = \frac{C_v \cdot d \cdot \mu_0}{T^m \cdot f^{y_0}} \quad (3.12)$$

gdje su:

C_v , μ_0 , y_0 , m : konstante ovisne od materijala

T – vrijeme trajanja alata (postojanost)

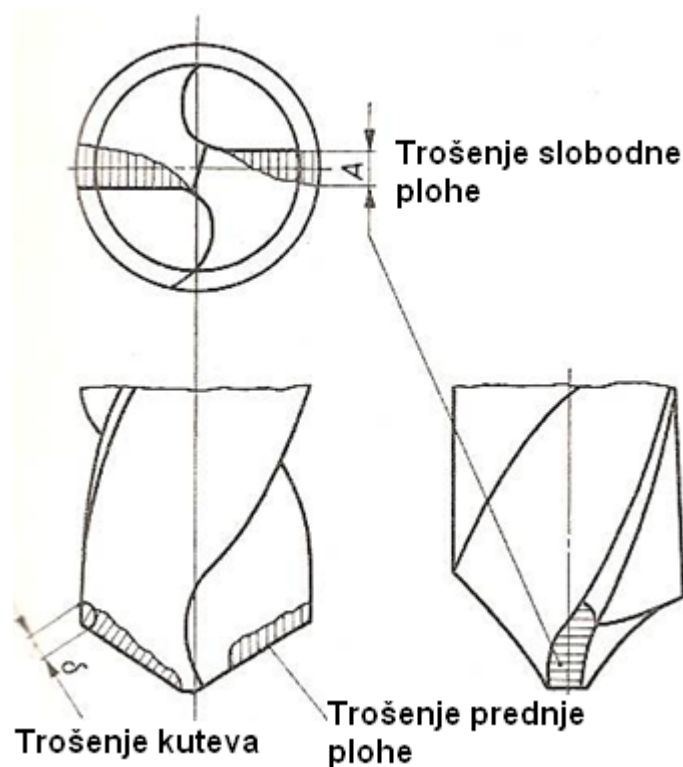
f – posmak (to je veličina natražne sile za 1 okretaj glavnog vretena)

d – promjer svrdla

μ_0 - koeficijent smanjenja brzine rezanja pri povećanju dubine bušenja [12]

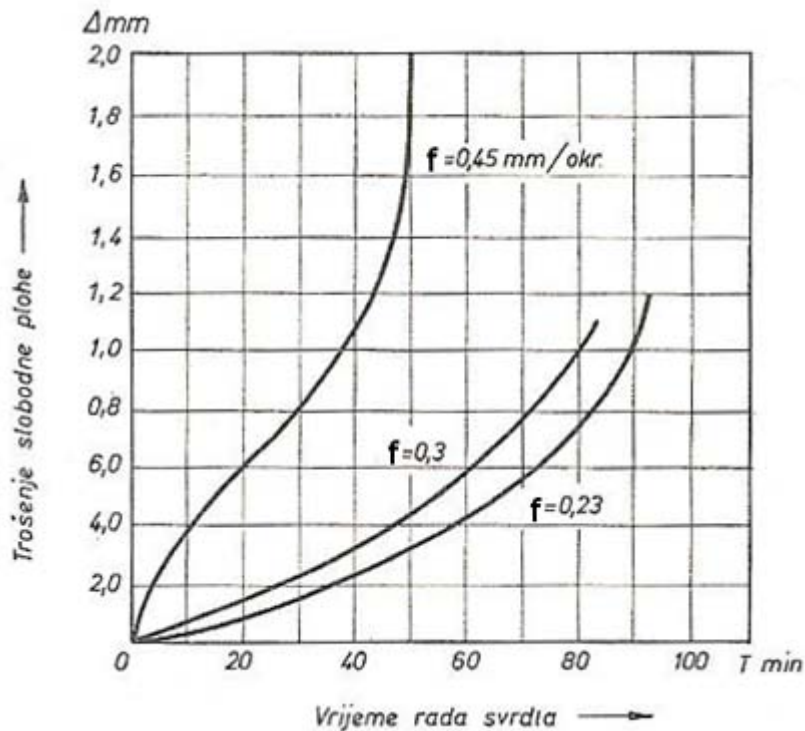
3.7 Trošenje i zatupljivanje svrdla

Pri bušenju se troše rezni bridovi, te se nakon nekog vremena svrdlo zatupi, jer je tijekom rada podvrgnuto mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima. Trošenje osjetno nastupa na slobodnoj, prednjoj plohi i kutovima kod prijelaza glavnih reznih bridova na cilindrični dio. Zatupljivanje se širi i na poprečni rezni brid. Slika 18 prikazuje trošenje reznih ploha na svrdlu. Kod obrade čelika više se troši slobodna ploha, a kod lijevanog željeza i bronce više se troše kutovi. Trošenje slobodne plohe nastupa najviše na obodu, a prema centru se smanjuje. Dužina istrošenja slobodne plohe može se uzeti kao znak zatupljivanja svrdla. Naravno, važno je naglasiti da se s povećanjem trošenja alata smanjuje točnost obrade. [12]



Slika 18. Prikaz trošenja reznih ploha na svrdlu [12]

Na slici 19 vidi se kako raste istrošenje na slobodnoj plohi za vrijeme rada svrdla ovisno o posmaku. Što je manji posmak istrošenje će biti manje. Izdržljivost svrdla ovisi od brzine rezanja, posmaka i dubine rezanja a_p .



Slika 19. Prikaz istrošenja slobodne plohe [12]

Tupi alat povećava sile rezanja, koje povećavaju deformaciju radnog obratka, uslijed čega može doći do stvaranja vibracija, koje mogu pogoršati kvalitetu obrađene površine. Povećanje potrebne snage rezanja uzrokuje povećanje temperature, koja povećava brzinu trošenja alata. Najnepovoljniji oblik trošenja jest istrošenje uglova i ruba svrdla budući su brzine rezanja na tim mjestima maksimalne.

Trošenje svrdla pojavljuje se u dva osnovna oblika :

- potpuno istrošenje (lom oštrice)
- relativno istrošenje (učinak alata se toliko smanjio da nastupaju poteškoće u daljnjem radu)

Mehanizmi trošenja alata klasificiraju se u četiri osnovne grupe:

1. Adhezijsko trošenje - koje uzrokuje međusobno «zavarivanje» vrhova površina koje su u dodiru (klizanju)
2. Abrazijsko trošenje - koje je uzrokovano skidanjem odvojene čestice
3. Difuzijsko trošenje - između materijala odvojene čestice i materijala alata na nivou atoma dolazi do difuzije atoma iz jedne površine u drugu
4. Korozijsko trošenje - koje uzrokuju elektrokemijski mehanizmi, koji djeluju na površinama dodira [12]

3.8 Utjecajni faktori prilikom odabira brzine rezanja kod bušenja

Glavni cilj kod procesa obrade odvajanjem čestica je da kod obrade nekog materijala alat ima što duži vijek trajanja. To znači da bi kod odabira brzine rezanja bilo najprihvatljivije izabrati onu brzinu kod koje će produktivnost proizvodnje biti najveća.

Na brzinu rezanja kod bušenja utječu sljedeći faktori:

1. materijal obratka
2. materijal reznog dijela svrdla
3. vijek trajanja svrdla
4. promjer svrdla
5. posmak
6. dubina bušenja
7. geometrija svrdla
8. hlađenje i podmazivanje

Potpuno je jasno da na odabir brzine rezanja utječu materijal od kojeg je izrađen obradak i materijal od kojeg je izrađen rezni dio svrdla.

3.8.1 Utjecaj vijeka trajanja svrdla

Postoje tri mogućnosti definiranja postojanosti oštrice alata:

1. postojanost definirana vremenom koje alat može provesti u obradi prije nego dođe do istrošenja koje je definirano kao dozvoljena istrošenost alata
2. postojanost definirana duljinom puta u smjeru glavnog gibanja. Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka provlačenja, dok kod drugih postupaka obrade odvajanjem čestica uglavnom nije u primjeni
3. postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja. Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka bušenja, a može naći primjenu i kod većine drugih postupaka obrade odvajanjem čestica

3.8.2 Utjecaj promjera svrdla

Deformacije u radu su manje kod svrdla većeg promjera. Kod istog vijeka trajanja i nepromijenjenih drugih uvjeta, svrdlo većeg promjera dozvoljava veće brzine rezanja od svrdla manjeg promjera. To je zato jer se većim promjerom svrdla povećava njegova masa, povećava se odvođenje topline, povećava se utor za odvođenje odvojene čestice i dovod rashladne tekućine do oštrice svrdla.

3.8.3 Utjecaj posmaka

Na vijek trajanja svrdla i brzinu rezanja, posmak kod bušenja ima sličan utjecaj kao i kod tokarenja. To znači da se sa povećanjem posmaka mora smanjiti brzina rezanja ako se želi zadržati isti vijek trajanja rezne oštrice alata. No s druge strane, povećanjem posmaka se smanjuje i glavno vrijeme obrade što pozitivno utječe na troškove proizvodnje.

3.8.4 Utjecaj dubine izbušenog provrta

Mnogobrojnim ispitivanjima ustanovljeno je da se sa povećanjem dubine bušenja smanjuje vijek trajanja svrdla. Uzrok tome su promijenjeni uvjeti rada kod većih dubina bušenja, a oni su:

- otežano odvođenje stvorene topline
- povećanje trenja između odvojenih čestica i utora na svrdlima
- otežan dovod sredstava za hlađenje i podmazivanje do oštrice svrdla

3.8.5 Utjecaj oblika brušenja svrdla

Nedostaci brušenja uvelike utječu na trošenje i vijek trajanja, a samim time i na brzinu rezanja za promatrano svrdlo. Ispitivanja su pokazala da promjena oblika brušenja svrdla u znatnoj mjeri smanjuje njihove nedostatke, a samim time i povećava vijek trajanja svrdla i dopuštenu brzinu rezanja.

3.8.6 Utjecaj hlađenja i podmazivanja

Primjena tekućine za odvođenje topline stvorene pri bušenju je vrlo važna. Osobito je važna primjena hlađenja pri bušenju metala. Kod bušenja, hlađenjem je moguće povećati dozvoljene brzine rezanja za 1,4 do 1,5 puta. Sredstvo za hlađenje, SHIP - ima višestruku ulogu kod bušenja, za hlađenje i podmazivanje. Najvažnija je odvođenje topline prouzročene bušenjem. Ostale uloge su podmazivanje površine alata na kojoj se razvija trenje, odstranjivanje odvojene čestice materijala, smanjenje djelovanja sile rezanja i osiguranje kemijske zaštite površine predmeta koja nastaje procesom obrade. Kod većeg promjera svrdla jasno je da će protok SHIP-a biti veći.

3.9 Sile rezanja i momenti kod bušenja

Sila rezanja kod bušenja je određena silama koje djeluju na svakoj reznjoj oštrici.

Na sljedećoj slici prikazane su sile koje djeluju na svrdlo kod bušenja.

Na glavnu oštricu djeluju:

- dvije jednake ali suprotnog smjera glavne sile rezanja $\frac{F_c}{2}$
- dvije jednake i istog smjera posmične sile $\frac{F_f}{2}$
- dvije jednake ali suprotnog smjera natražne sile $\frac{F_p}{2}$

Na poprečnoj oštrici djeluju:

- dvije jednake ali suprotnog smjera glavne sile rezanja poprečne oštrice $\frac{F_{CP}}{2}$
- posmična sila poprečne oštrice F_{fp}

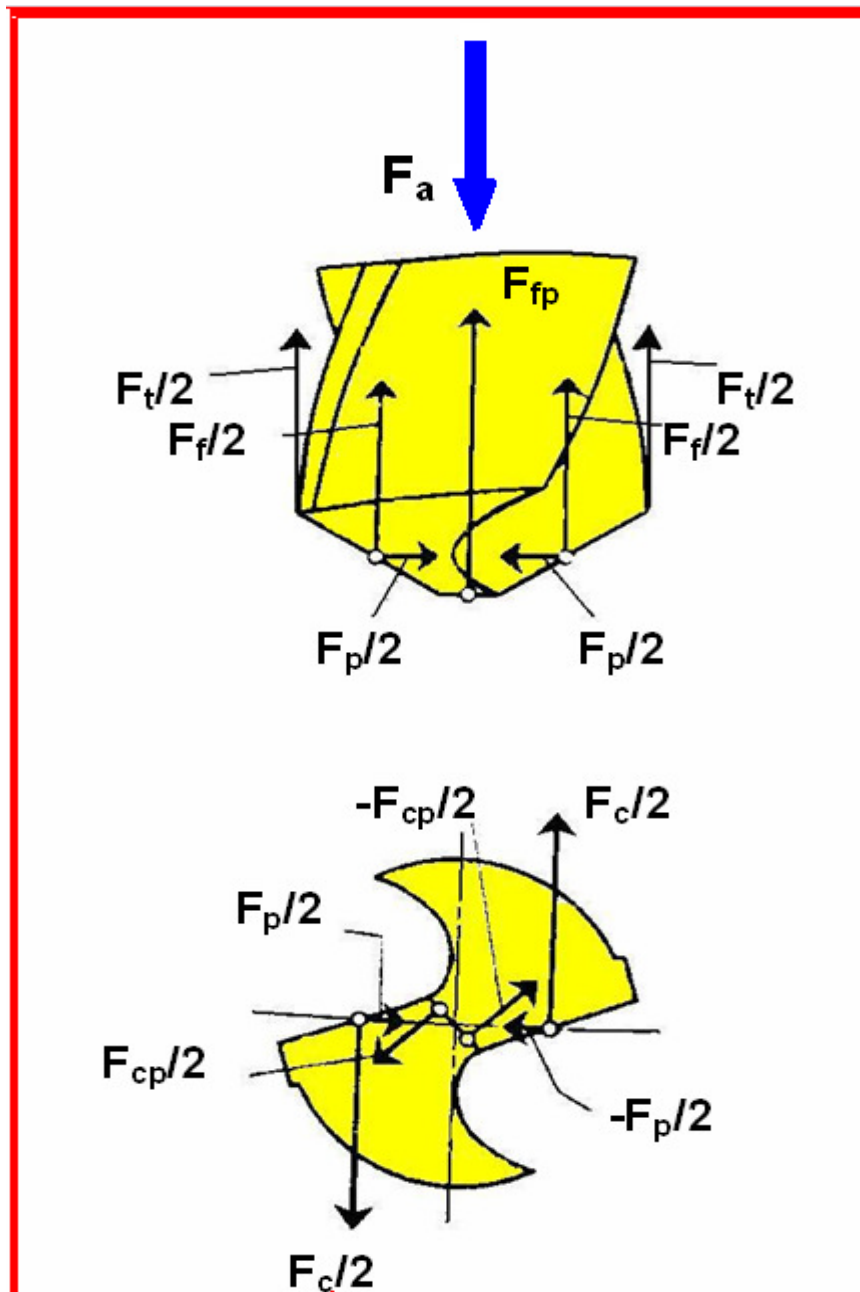
Osim ovih sila prilikom bušenja javljaju se još na svrdlu sile trenja $\frac{F_t}{2}$ uzrokovane trenjem svrdla, obrađene površine i odvojenih čestica.

Sve otpore kojima materijal djeluje u smjeru svrdla savladavamo aksijalnom silom bušenja F_a koja je jednaka:

$$F_a = F_f + F_{fp} + F_t \quad (3.13)$$

Istraživanja su pokazala da od ukupne aksijalne sile bušenja F_a :

- oko 45 % otpada na posmične sile glavnih oštrica
- oko 50 % na posmičnu silu poprečne oštrice
- oko 5 % na savladavanje sile trenja



Slika 20. Sile rezanja u procesu bušenja [14]

Na svaku glavnu oštricu svrdla djeluje glavna sila rezanja F_C koja se računa prema izrazu: [7]

$$F_C = \frac{D \cdot f}{4} \cdot k_C \quad (3.14)$$

Zbog djelovanja glavnih sila F_C i $(-F_C)$ na približnom rastojanju od $l_h = \frac{d}{2}$ javlja se

$$\text{spreg sila odnosno moment } M: \quad M = F_C \cdot \frac{D}{2} = \frac{D^2 \cdot f}{8} \cdot k_C \quad (3.15)$$

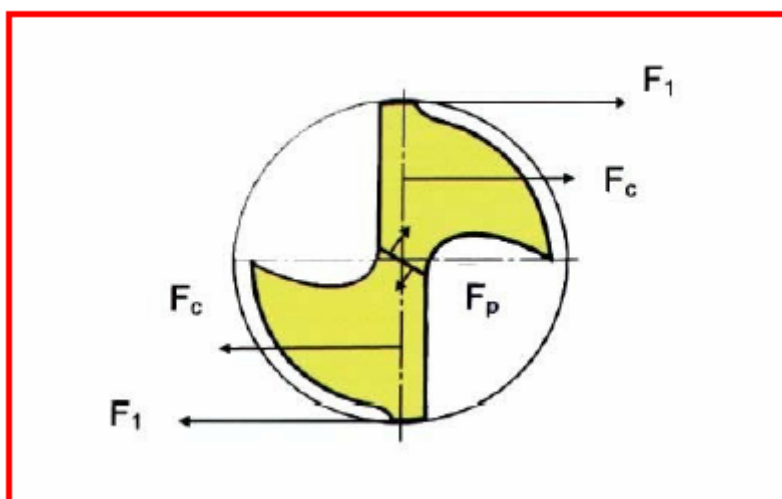
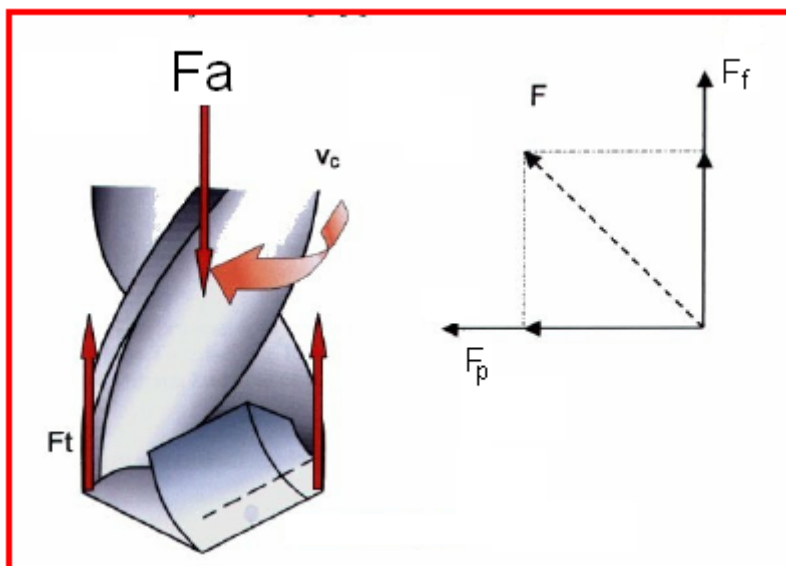
Gdje je:

k_C = specifična rezna sila za računanje glavne sile [7]

Ispitivanjem je utvrđeno, da na silu poprečne oštrice otpada oko 50 % ukupne sile posmaka. Ukupni moment M_U , kojim je opterećeno svrdlo, sastoji se od momenta M_{Fc} uslijed glavnih sila rezanja F_C , momenta M_{Fp} izazvanog silama rezanja poprečne oštrice F_p , koje djeluju na poprečnoj oštrici i momenta M_{Ft} , od sila trenja F_1 , koje djeluju na cilindričnim rubovima svrdla.

$$M_U = M_{Fc} + M_{Fp} + M_{F1} \quad (3.16)$$

Od ukupne vrijednosti momenta bušenja, oko 80 % se odnosi na moment na glavnim reznim oštricama, oko 10 % na moment izazvan silama na poprečnoj oštrici i oko 10 % na moment sila trenja koje se javljaju na rubovima svrdla.



Slika 21. Sile rezanja kod bušenja [14]

Gdje je:

F_0 - sila posmaka

F_t - sila trenja

F_c - glavna sila rezanja

F_p - sila na poprečnu oštricu

F_1 - sila na rub svrdla

4. Elektromotorni pogon

Strojevi koji proizvode mehanički rad nazivaju se motori, a strojevi koji se pokreću električnom energijom nazivaju se elektromotori. Pogoni kod kojih se za pogon radnog mehanizma koristi mehanička energija dobivena pomoću elektromotora nazivaju se elektromotorni pogoni (EMP). Električni strojevi pretvaraju jedan oblik energije u drugi na principu elektromagnetske indukcije i sile na vodič u magnetskom polju, kojim protječe struja. Elektromotori su takvi električni strojevi koji pretvaraju električnu u mehaničku energiju za potrebe određenog pogona. Današnja industrijska proizvodnja nezamisliva je bez elektromotornih pogona. Masovna primjena EMP dovodi do gradnje specijalnih vrsta elektromotora namijenjenih specifičnoj primjeni pri čemu je posebno važno voditi računa o uvjetima okoline u kojoj se motor primjenjuje. Elektromotori tako postaju lakši i pouzdaniji, troškovi održavanja su manji, a snaga i iskoristivost motora se povećavaju.

Zbog svojih prednosti pred drugim motornim pogonima elektromotorni pogon danas je najčešće primjenjiv motorni pogon. [16]

4.1 Glavni dijelovi elektromotornog pogona

Glavni element EMP je elektromotor. On može davati mehaničku energiju radnom stroju potrebnu za obavljanje nekog procesa, a često može i automatski regulirati, posredstvom regulacijskih elemenata, određeni radni proces. Između elektromotora i radnog stroja postoji mehanička veza, a između izvora, upravljačkih elemenata i elektromotora postoji električna veza.

Svaki EMP u osnovi se sastoji od sljedećih elemenata:

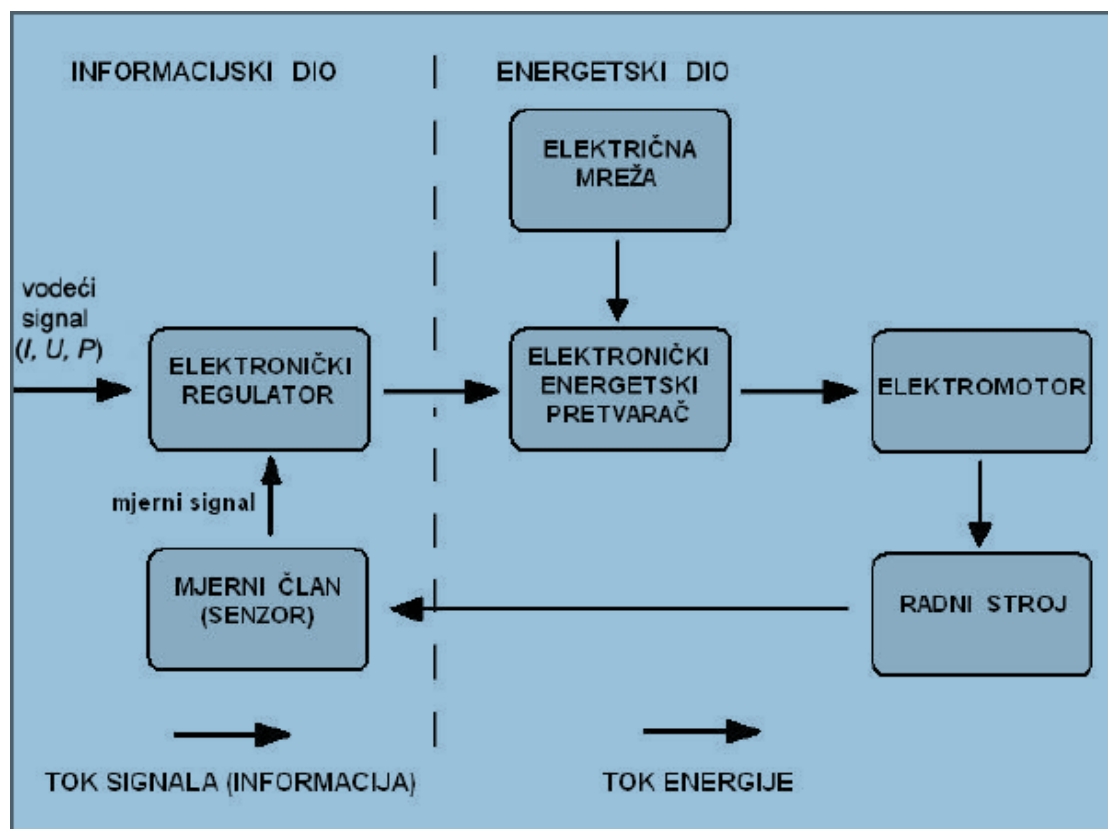
- radni stroj – mehanizam koji obavlja radni proces
- elektromotor koji pretvara električnu energiju u mehaničku
- spojni elementi - spojke, tarenice, remenice, koje mehanički povezuju elektromotor i radni stroj
- priključni i upravljački elementi kojima se elektromotor priključuje na izvor električne energije
- zaštitni uređaji kojima se elektromotor i uređaji osiguravaju protiv preopterećenja u radu. [16]

Važno je napomenuti da elektromotori imaju znatno veću korisnost u odnosu na ostale motore. Rad elektromotora temelji se na magnetski povezanim strujnim krugovima.

Kako je za pretvorbu energije potrebno relativno gibanje vodiča prema magnetskom polju, električni rotacijski strojevi sastoje se od dva glavna dijela:

- nepomični dio - stator
- pomični dio - rotor

Između ta dva glavna dijela je uzak zračni raspor u kojem se održava magnetsko polje indukcije B , proizvedeno elektromagnetskim putem ili stalnim, permanentnim magnetima. Na slici 22 je prikazana osnovna struktura upravljanja elektromotornim pogonom.

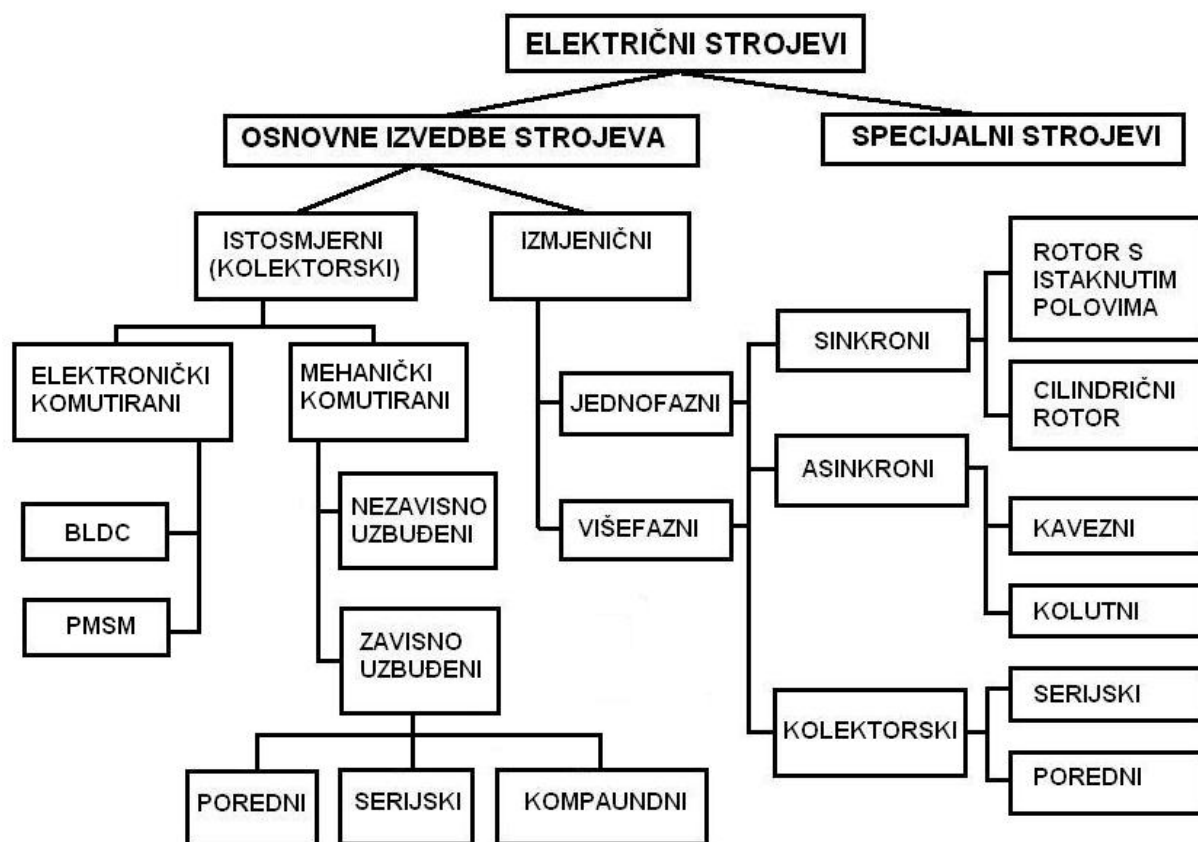


Slika 22. Osnovna struktura upravljanja elektromotornog pogona [17]

Promjene u radu ostvaruju se promjenom parametara napajanja motora pomoću elektroničkih pretvornika. Elektroničkim pretvaračima upravlja elektronički regulator u informacijskom dijelu pogona. Regulacijom se nastoji postići jednakost između vodeće (referentne) i stvarne (izmjerene) vrijednosti upravljane veličine. Ako ne postoji povratna veza s mjernim članom, elektromotornim pogonom se upravlja u otvorenom krugu. Prednosti takvog upravljanja su jednostavnost i niža cijena u odnosu na zatvoreni krug. Nedostaci su niža kvaliteta statičkog i dinamičkog ponašanja i veća osjetljivost pogona na poremećajne veličine. [17]

4.2 Podjela elektromotora

Elektromotori se obzirom na vrstu struje koja teče kroz priključne vodove dijele na strojeve istosmjerne i strojeve izmjenične struje. Izmjenični elektromotori mogu biti jednofazni i višefazni (najčešće trofazni). S obzirom na uzбудu i izvedbu rotora, elektromotori se dijele na sinkrone, asinkrone i kolektorske. Slika 23 prikazuje detaljnu podjelu električnih strojeva.



Slika 23. Podjela električnih strojeva [17]

Specijalni strojevi također mogu biti asinkroni, sinkroni i kolektorski. Podjela je moguća i prema određenim pogonski karakteristikama, izvedbenom obliku, vrsti mehaničke zaštite, iznosu nazivne brzine vrtnje itd.

Elektromotori istosmjerne struje (DC motori) su električni rotacijski strojevi kod kojih u vanjskom strujnom krugu teče istosmjerna struja. Takvi motori bili su razmjerno široko zastupljeni u elektromotornim pogonima zbog svojih vrlo dobrih regulacijskih svojstava. Tri su osnovna dijela ovih strojeva:

1. stator s uzбудnim namotom ili trajnim magnetima
2. rotor s armaturnim namotom
3. kolektor ili komutator koji rotira sa namotom na rotoru

4.3 Sinkroni elektromotori

Sinkroni elektromotori pripadaju strojevima izmjenične struje (AC motorima) kojima je sinkrona kutna brzina rotora čvrsto određena brojem pari polova « p » i frekvencijom napona « f » prema jednadžbi:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (4.1)$$

Prema tome frekvencija vrtnje n je konstantna i može se izraziti kao:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (4.2)$$

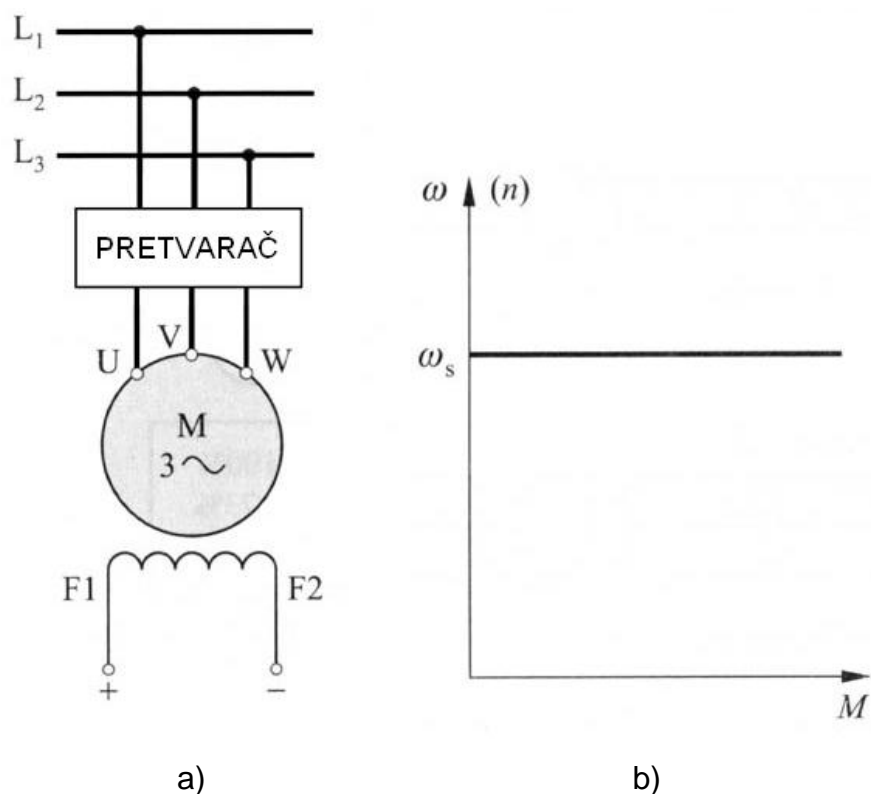
Sinkroni elektromotori koriste se u elektromotornim pogonima gdje je potrebna određena brzina okretanja bez obzira na opterećenje protumomentom. Pri tome rotor zaostaje za kut opterećenja β u odnosu na položaj neopterećenog rotora i razvija moment $M = -M$. Uzbuda sinkronog elektromotora u pravilu se izvodi ili trajnim magnetima ili elektromagnetima. Izvedba sinkronog elektromotora bez uzbude naziva se reluktantni elektromotor. Armaturni namot priključuje se na izmjeničnu, a uzбудni namot na istosmjernu struju, ako se uzbuda izvodi elektromagnetima.

Izmjenična struja u višefaznom statorskom namotu pobuđuje okretni magnetski tok koji rotira prema statoru sinkronom brzinom n_s . Prolazom istosmjerne uzbudne (primarne) struje I_1 kroz rotorski uzbudni namot stvara se magnetsko polje koje rotira istom brzinom n_s što znači da okretna polja statora i rotora zajedno rotiraju, pomaknuti za kut opterećenja β . Ovu značajku jednakih (sinkronih) brzina vrtnje okretnog polja statora i brzine vrtnje rotora imaju samo sinkroni strojevi po čemu su i dobili svoj naziv.

Prema izvedbi rotora razlikujemo strojeve s neistaknutim polovima (okrugli ili cilindrični rotor) koji se češće koriste za brzohodne elekromotore i strojeve s istaknutim polovima koji se češće koriste za sporohodne elektromotore. Brzina vrtnje rotora može se mijenjati promjenom frekvencije struje preko frekvencijskih pretvarača. Smjer vrtnje trofaznog sinkronog motora jednaka je smjeru vrtnje okretnog magnetskog polja i mijenja se zamjenom bilo koje dvije faze priključka u redoslijedu spajanja. Ovisnost brzine vrtnje o momentu (vanjska ili mehanička karakteristika) je pravac paralelan s apscisom što se vidi na slici 24.

Glavne karakteristike sinkronih motora:

- konstantna brzina vrtnje n
- veća specifična težina (kg/W) i cijena od asinkronih elektromotora
- ako se preuzbudi može popravljati faktor snage $\cos \varphi$
- kod velikih opterećenja ($\beta \geq 90^\circ$) ispadne iz sinkronizma [17]



Slika 24. Trofazni sinkroni elektromotor [17]

a) načelna shema spajanja

b) vanjska karakteristika

Trofazni sinkroni motori sa trajnim magnetima grade se sa klasičnim trofaznim namotom na statoru i trajnim magnetima postavljenim na rotoru. Kako ovi motori ne trebaju uzbudnu struju, ne stvaraju se gubici u rotoru pa imaju povoljniji faktor snage $\cos \varphi$ i korisnost η od asinkronih motora iste snage. Rotori su lagani i malog promjera zbog čega im je moment tromosti relativno mali te imaju dobra dinamička svojstva. Na mrežu se priključuju preko odgovarajućeg regulatora (s obavezno malom frekvencijom pri pokretanju) koji omogućava kontinuirano podešavanje brzine vrtnje od nula do nazivne. [17]

4.4 Permanentni magneti

Permanentni magneti proizvode se od feromagnetskih materijala (slitina) sa izrazito širokom krivuljom histereze. To svojstvo omogućuje takvim materijalima da postanu permanentni magneti nakon izlaganja snažnom magnetskom polju kroz vrijeme potrebno za postizanje trajne magnetičnosti. Nakon izlaganja magnetskom polju jakosti H sve do zasićenja, u materijalu se zadržava veliki remanentni (zaostali) magnetizam. Permanentni magneti su nakon toga sposobni trajno davati magnetsko polje indukcije B . Permanentnim magnetima moguće je oduzeti svojstvo magnetičnosti tj. smanjiti im remanenciju (trajnu magnetsku indukciju) na vrijednost 0 postupkom demagnetiziranja. Jedan od takvih postupaka je izložiti magnet snažnom magnetskom polju ali suprotnog smjera. Za svaku vrstu permanentnog magneta definirana je koercitivna sila H_{ci} , koja govori o potrebnoj jakosti magnetskog polja kojemu permanentni magnet treba biti izložen da bi se demagnetizirao. Ta koercitivna sila najbolje opisuje otpornost određenog magneta na demagnetizaciju. Maksimalna energija koju permanentni magnet daje ovdje je definirana produktom magnetske indukcije B i jakosti magnetskog polja H . Demagnetiziranje je također moguće zagrijavanjem permanentnog magneta na temperaturu koja se naziva Curieva temperatura T_c . Zato se za svaki magnet propisuje radna temperatura T_{max} , koja je niža od Curieve temperature za taj magnet.

Danas su najpoznatiji neodimijski permanentni magnet i samarij-kobalt permanentni magnet. Neodimijski magneti daleko su jači od poznatih feritnih magneta i trenutno su najjači poznati magneti.

Neodimijski magnet osnovnog sastava $Nd_2Fe_{14}B$ ima izuzetno povoljnu $B-H$ karakteristiku, znatno je jeftiniji od samarij-kobalt permanentnog magneta, a usprkos tome ima veću indukciju, koercitivnost i maksimalni energetske produkt. Magnetska svojstva neodimijskih magneta ovise o strukturi svojih legura, mikrostrukturi i samom načinu proizvodnje magneta. Neodimijski magneti imaju najveću koercitivnu silu H_c što znači i najbolji otpor demagnetiziranju. Proizvode se u više jačina, koje se označavaju slovom N i brojem od N 24 do N 55. Radne temperature neodimijskih magneta su najviše do 120°C, jer je Curieva temperatura pri kojoj se gube

magnetska svojstva od 80°C do 200°C. Neodimijski magneti su zamijenili feritne magnete na puno mjesta u modernoj tehnologiji (sinkroni motori, zvučnici, tvrdi diskovi, itd.).

Samarij-kobalt magneti su drugi najjači poznati magneti. Razvijeni su 1970-ih godina, kemijski sastav im je najčešće $SmCo_5$, a proizvode se sinteriranjem iz praha. Zbog svojeg kemijskog sastava i načina proizvodnje vrlo su tvrdi i krhki. Cijena samarij-kobalt permanentnih magneta dvostruko je viša od neodimijskih magneta. Radne temperature samarij-kobaltovih magneta su između 200°C i 550°C jer je Curieva temperatura pri kojoj se gube magnetska svojstva od 700°C do 800°C. [18]

4.5 Elektromotori s permanentnim magnetima (PM)

Napredak u proizvodnji materijala (slitina) za permanentne magnete doveo je do sve veće primjene električnih strojeva s permanentnim magnetima u mnogim područjima. Moderni električni strojevi s permanentnim magnetima ugrađuju se u robote, generatore vjetroelektrana, alatne strojeve, električna ili hibridna vozila, različitu opremu u medicini i mnoge druge sklopove.

Permanentni magneti u elektromotorima upotrebljavaju se za postizanje uzbudnog magnetskog toka, tj. zamjenjuju uzbudni namot. S pojavom modernih neodimijskih magneta, strojevi s permanentnim magnetima sve se više upotrebljavaju u primjenama gdje su korisnost, odnosno gubitci važnija stavka u radu. Budući da elektromotori s PM nemaju dovođenje uzbudne struje na rotor, jer se uzbuda dobiva iz permanentnih magneta, manji su gubitci zbog razvijene topline u motoru.

Prednosti elektromotora s permanentnim magnetima:

- nema uzbudnog namota, pa nema ni gubitaka u bakru toga namota
- velik moment i izlazna snaga u malim dimenzijama elektromotora
- jednostavnija konstrukcija i održavanje jer nema kolektora, komutatora, četkica i ostalih dijelova kao kod mehanički komutiranih elektromotora
- gustoća magnetskog toka u zračnom rasporu je velika pa je i dinamika elektromotora izvrsna
- manja masa i dimenzije rotora pa je smanjena i inercija

Postoji više principa gradnje elektromotora s permanentnim magnetima.

Tako se elektromotori s PM mogu razlikovati prema:

1. usmjerenosti magnetskog toka radijalno ili aksijalno u elektromotoru
2. rotoru kao vanjskom ili unutarnjem dijelu elektromotora
3. načinu smještaja magneta
4. komutaciji motora s PM

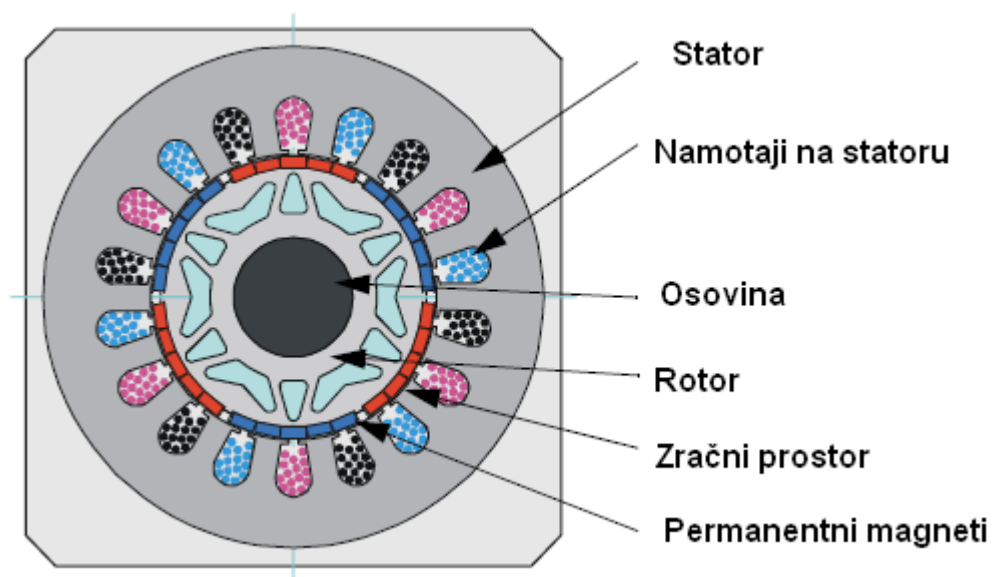
Elektromotori sa permanentnim magnetima (PM) mogu biti podijeljeni prema načinu rada u tri glavne skupine:

1. Mehanički komutirani elektromotori istosmjerne struje s PM
(PMDC prema eng. Permanent magnet direct current),
2. Elektronički komutirani istosmjerne struje s PM
(BLDC prema eng. Brushless direct current),
3. Sinkroni elektromotori sa permanentnim magnetima
(PMSM od eng.: Permanent magnet synchronous motor)

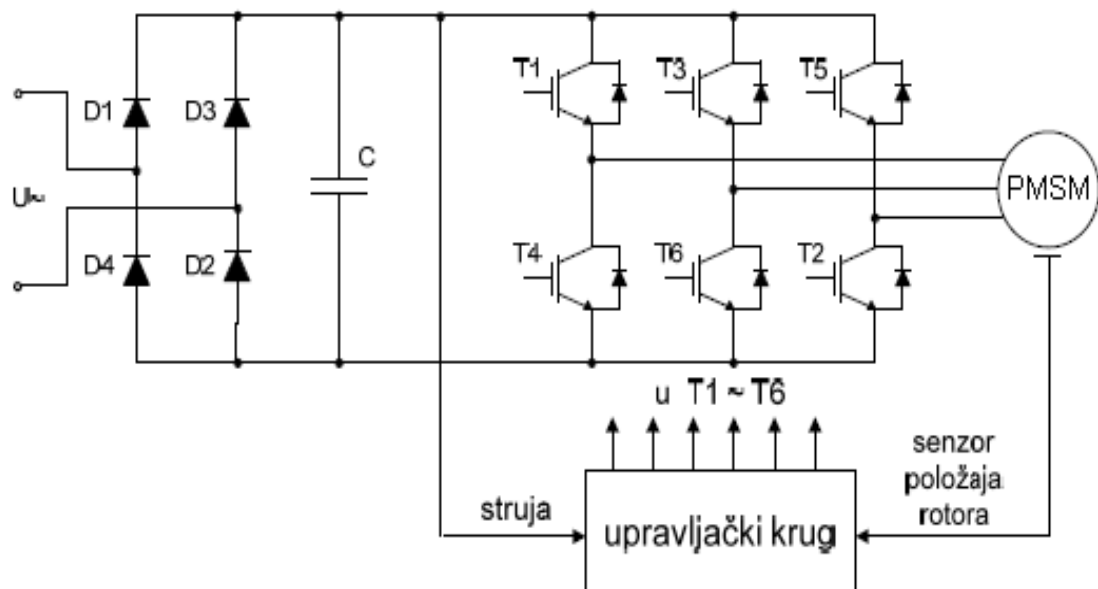
4.6 Sinkroni elektromotori s permanentnim magnetima (PMSM)

Sinkroni elektromotori s permanentnim magnetima spadaju u grupu elektronički komutiranih motora kod kojih se uloga mehaničkog komutatora zamijenila komutacijom faza izravno u elektroničkom izvoru napajanja. Komutacija faza izvodi se elektronički u sklopu odgovarajućeg regulatora, pri čemu se mehanički položaj rotora mjeri osjetilnim elementima (optičkim sprežnicima ili halovim sondama).

Ovakva izvedba sadrži permanentne magnete na rotoru, a stator sadrži trofazni armaturni namot na koji se dovodi izmjenična struja. U osnovnoj izvedbi ovaj motor inducira sinusoidalnu povratnu elektromotornu silu (EMS), i zbog toga zahtjeva sinusoidalne struje statora, da bi proizveo konstantan moment. Rotirajući magnetski tok u zračnom rasporu sinkronog elektromotora s PM predstavlja osnovnu razliku u odnosu na stacionarni magnetski tok istosmjernog elektromotora. Permanentni magneti na rotoru osiguravaju konstantnu uzbuđu, dok se u pogledu ostalog ovakav elektromotor bitnije ne razlikuje od klasičnog sinkronog elektromotora.



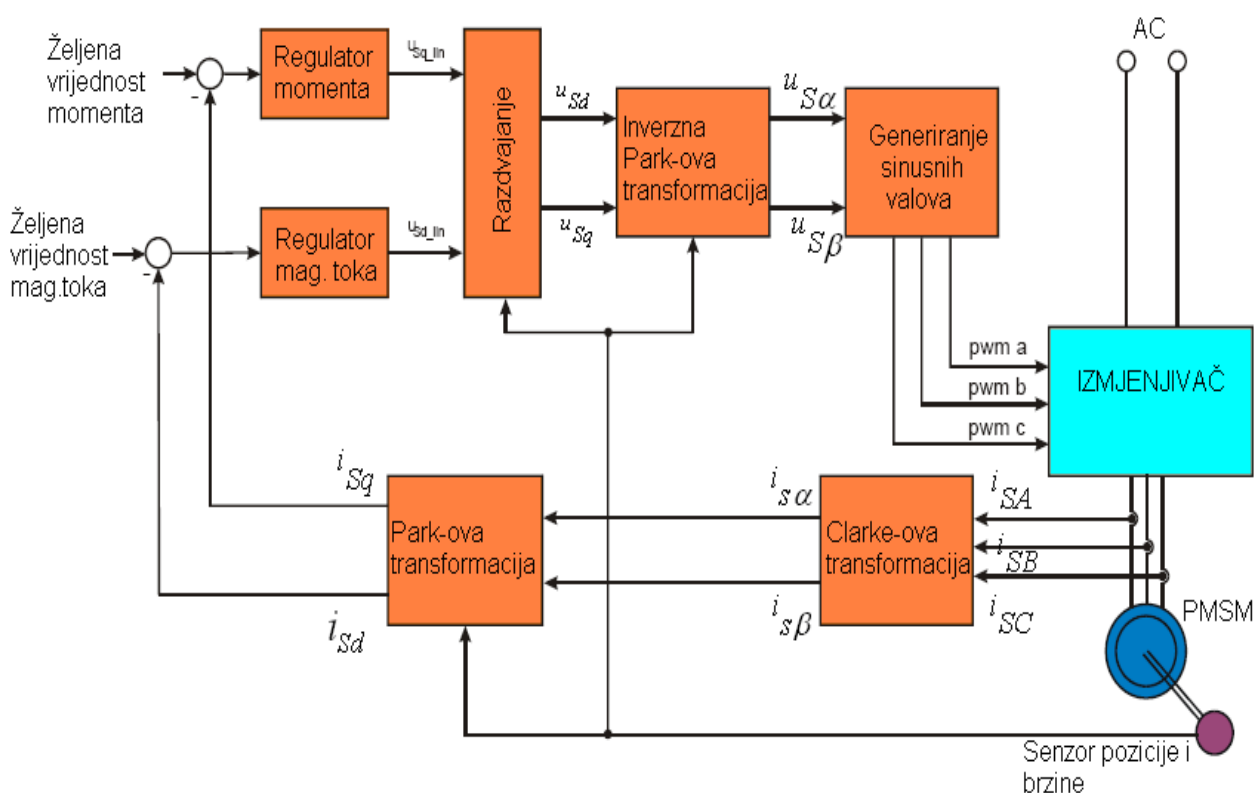
Slika 25. Trofazni elektromotor s permanentnim magnetima [19]



Slika 26. Regulacijski krug sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima [20]

Na ulaz se dovodi izmjenična struja koja se kroz diode i kondenzator pretvara u istosmjernu. Ta istosmjerna struja dolazi u inverterski most gdje se pretvara u izmjeničnu struju odgovarajuće frekvencije i amplitude. Inverter se sastoji od 3 dijela (polu-mosta) kod kojih su gornji i donji prekidač komplementarno regulirani. Izlazni napon je najčešće kreiran sa PWM signalima (pulse width modulation – podešavanje širine pulsa) gdje se jednakokračni trokutni val uspoređuje sa osnovnom frekvencijom sinusnog vala. Kako bi saznali trenutak u kojem moramo mjeriti struju, moramo napraviti analizu oblika napona. Trenutak mjerenja se određuje uz pomoć PWM perioda. Kod trofaznih motora mjere se dvije struje, a treća se računa.

4.6.1 Vektorska regulacija momenta



Slika 27. Blok dijagram vektorske kontrole PMSM [19]

Sinkroni elektromotori s permanentnim magnetima koriste PWM modul kako bi omogućili generiranje regulacijskih signala. PWM modul sadržava PWM generator koji generira 3 sinusna oblika međusobno zakrenuta za 120 stupnjeva. Vrijednosti trofaznog elektromotora (napon, struja, magnetski tok) su izražene u obliku složenih prostornih vektora. Složeni prostorni vektori se mogu opisati koristeći samo dvije ortogonalne osi. Elektromotor se može promatrati kao dvofazni stroj, čime je moguće smanjiti broj jednačbi i pojednostaviti regulaciju. [19]

Ako su i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} trenutne struje trofaznog statora vrijedi jednačba:

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (4.3)$$

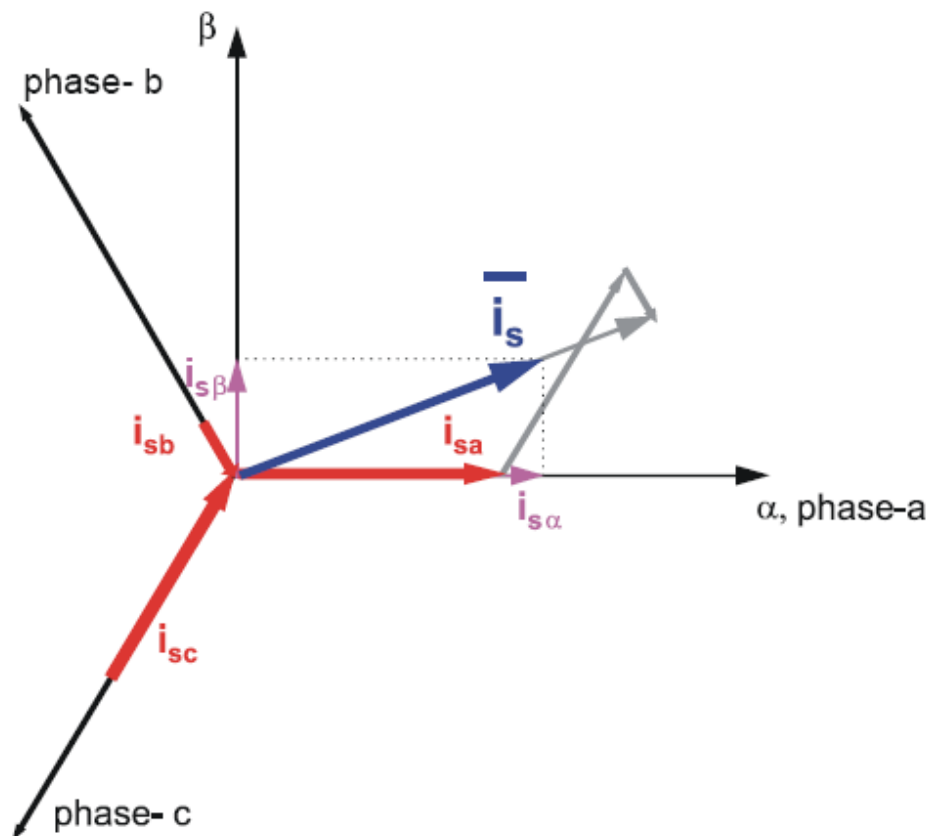
Možemo definirati prostorni vektor struje statora:

$$\vec{i}_s = k(i_{sa} + ai_{sb} + a^2i_{sc}) \quad (4.4)$$

gdje je:

k – transformacijska konstanta

a , a^2 - prostorni operatori ($a = e^{j2\pi/3}$, $a^2 = e^{j4\pi/3}$)



Slika 28. Prostorni vektor struje statora [19]

Prostorni vektor struje statora se može opisati i koristeći samo 2 ortogonalne osi. Realni dio prostornog vektora jednak je trenutnoj vrijednosti komponente struje statora $i_{s\alpha}$, dok je imaginarni dio jednak trenutnoj vrijednosti komponente struje statora $i_{s\beta}$. Tako se prostorni vektor struje statora može zapisati:

$$\vec{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta} \quad (4.5)$$

Kod trofaznog motora $i_{s\alpha}$ i $i_{s\beta}$ su zamišljene dvofazne komponente struje koje su povezane sa stvarnim trofaznim strujama statora na sljedeći način:

$$i_{s\alpha} = k(i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sb} - \frac{1}{2}i_{sc}) \quad (4.6)$$

$$i_{s\beta} = k \frac{\sqrt{3}}{2}(i_{sb} - i_{sc}) \quad (4.7)$$

gdje je:

k – transformacijska konstanta [19]

Prostorni vektori ostalih vrijednosti elektromotora (napon, struja, magnetski tok) mogu se definirati na isti način kao i prostorni vektor struje statora.

Jednadžbe napona na statoru u nekom trenutku glase:

$$u_{SA} = R_S i_{SA} + \frac{d}{dt} \psi_{SA} \quad (4.8)$$

$$u_{SB} = R_S i_{SB} + \frac{d}{dt} \psi_{SB} \quad (4.9)$$

$$u_{SC} = R_S i_{SC} + \frac{d}{dt} \psi_{SC} \quad (4.10)$$

gdje su:

u_{SA}, u_{SB}, u_{SC} - trenutne vrijednosti napona na statoru na fazama SA, SB i SC

i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} - trenutne vrijednosti struje na statoru na fazama SA, SB i SC

$\psi_{SA}, \psi_{SB}, \psi_{SC}$ - trenutne vrijednosti magnetskog toka na statoru na fazama

SA, SB i SC

[19]

Zbog velikog broja jednađbi, praktičnije je jednađbe zapisati koristeći 2-osnu teoriju (tzv. Clarkeovu transformaciju) gdje jednađbe za PMSM glase:

$$u_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + \frac{d}{dt} \psi_{S\alpha} \quad (4.11)$$

$$u_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + \frac{d}{dt} \psi_{S\beta} \quad (4.12)$$

$$\psi_{S\alpha} = L_S i_{S\alpha} + \psi_M (\cos \Theta_r) \quad (4.13)$$

$$\psi_{S\beta} = L_S i_{S\beta} + \psi_M (\sin \Theta_r) \quad (4.14)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \left[\frac{3}{2} p (\psi_{S\alpha} i_{S\beta} - \psi_{S\beta} i_{S\alpha}) - T_L \right] \quad (4.15)$$

gdje je:

α, β - statorski koordinatni sustav

$u_{S\alpha, \beta}$ - statorski napon

$i_{S\alpha, \beta}$ - statorska struja

$\psi_{S\alpha, \beta}$ - magnetski tok statora

ψ_M - magnetski tok rotora

R_S - otpor statora

L_S - induktivitet statora

ω, ω_F - brzina rotora/brzina polja

p – broj polova po fazi

J – inercija

T_L – moment

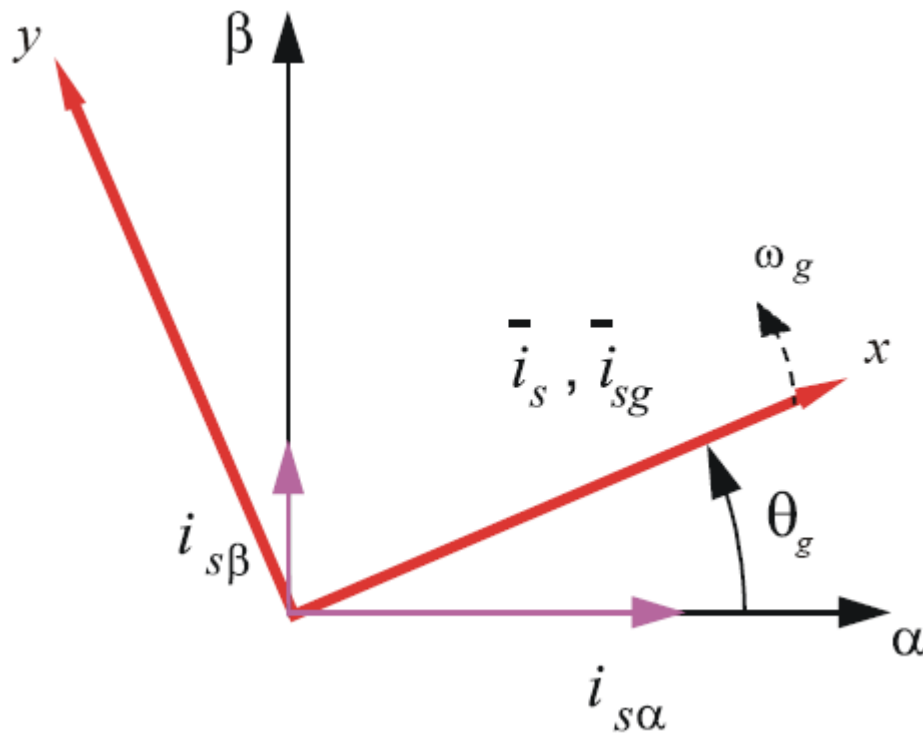
Θ_r - pozicija rotora u α, β koordinatnom sustavu [19]

Prethodne jednađbe predstavljaju PMSM u stacionarnom koordinatnom sustavu α, β pridruženom statoru.

Osim preko stacionarnog koordinatnog sustava pridruženom statoru, jednađbe prostornih vektora elektromotora mogu se formulirati i pomoću glavnog koordinatnog

sustava koji se okreće glavnom brzinom ω_g . Kao što je prikazano na slici 27, koordinatne osi x, y se rotiraju glavnom brzinom $\omega_g = \frac{d\Theta_g}{dt}$, gdje je Θ_g kut između osi x i α . Slijedi da je prostorni vektor struje statora u glavnom koordinatnom sustavu:

$$\overline{i_{sg}} = \overline{i_s} e^{-j\Theta_g} = i_{s\alpha} + ji_{s\beta} \quad (4.16)$$



Slika 29. Primjena glavnog koordinatnog sustava [19]

Na sličan način se u glavnom koordinatnom sustavu mogu dobiti prostorni vektori napona i magnetskog toka statora. Na sličan način možemo dobiti prostorne vektore napona struje i toka za rotor. Jednadžba za prostorni vektor struje rotora u glavnom koordinatnom sustavu glasi:

$$\overline{i_{rg}} = \bar{i}_r e^{-j(\Theta_g - \Theta_r)} = i_{rx} + j i_{ry} \quad (4.17)$$

gdje je:

\bar{i}_r - prostorni vektor struje rotora u koordinatnom sustavu rotora [19]

Na sličan način se u glavnom koordinatnom sustavu mogu dobiti prostorni vektori napona i magnetskog toka rotora.

Cilj vektorske regulacije je implementacija regulacijskih shema koje će osigurati visoke dinamičke performanse slične onima korištenih kod regulacije istosmjernih motora. Da bi se to postiglo, najčešće se gleda referentni koordinatni sustav poravnan sa prostornim vektorom toka rotora koji ima osi d i q . [19]

Nakon transformacije u d-q koordinate (tzv. Parkova transformacija) jednadžbe glase :

$$u_{Sd} = R_S i_{Sd} + \frac{d}{dt} \psi_{Sd} - \omega_F \psi_{Sq} \quad (4.18)$$

$$u_{Sq} = R_S i_{Sq} + \frac{d}{dt} \psi_{Sq} - \omega_F \psi_{Sd} \quad (4.19)$$

$$\psi_{Sd} = L_S i_{Sd} + \psi_M \quad (4.20)$$

$$\psi_{Sq} = L_S i_{Sq} \quad (4.21)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \left[\frac{3}{2} p (\psi_{Sd} i_{Sq} - \psi_{Sq} i_{Sd}) - T_L \right] \quad (4.22)$$

Uzimajući u obzir da je $i_{Sd} = 0$, prethodna jednadžba poprima oblik:

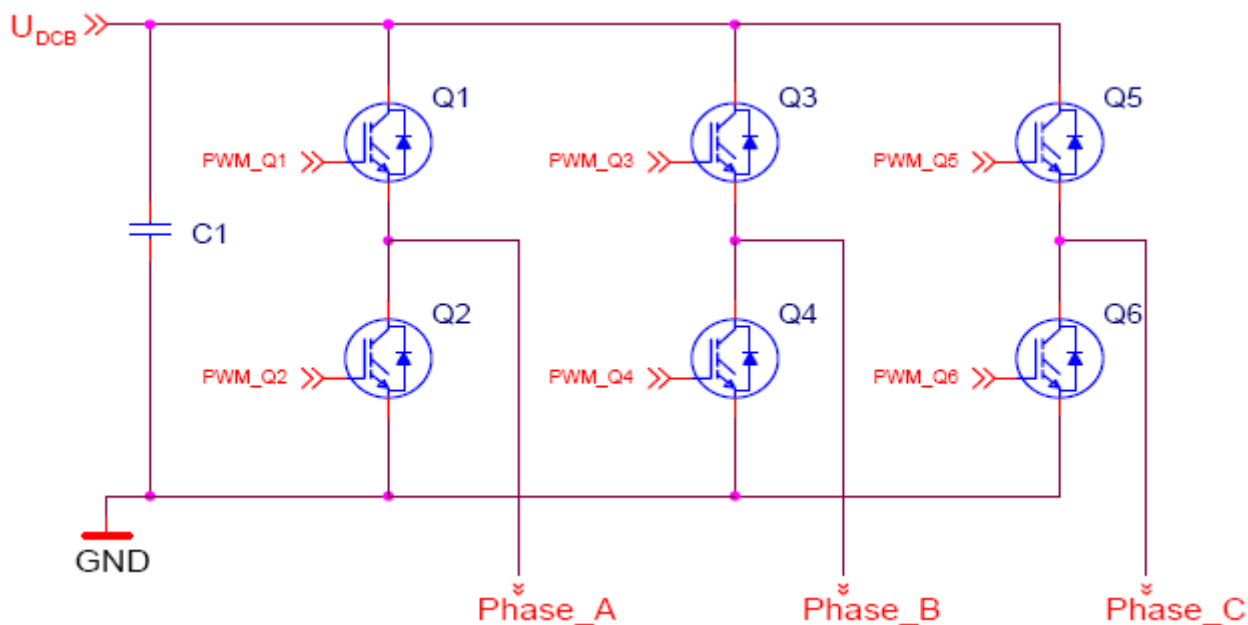
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \left[\frac{3}{2} p \psi_M i_{Sq} - T_L \right] \quad (4.23)$$

Iz prethodne jednadžbe je vidljivo da se moment može kontrolirati i da ovisi jedino o struji i_{Sq} . [19] Jednadžba momenta sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima (PMSM) glasi:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left(\psi_M i_{Sq} \right) \quad (4.24)$$

4.6.2 Digitalna regulacija sinkronih elektromotora s permanentnim magnetima

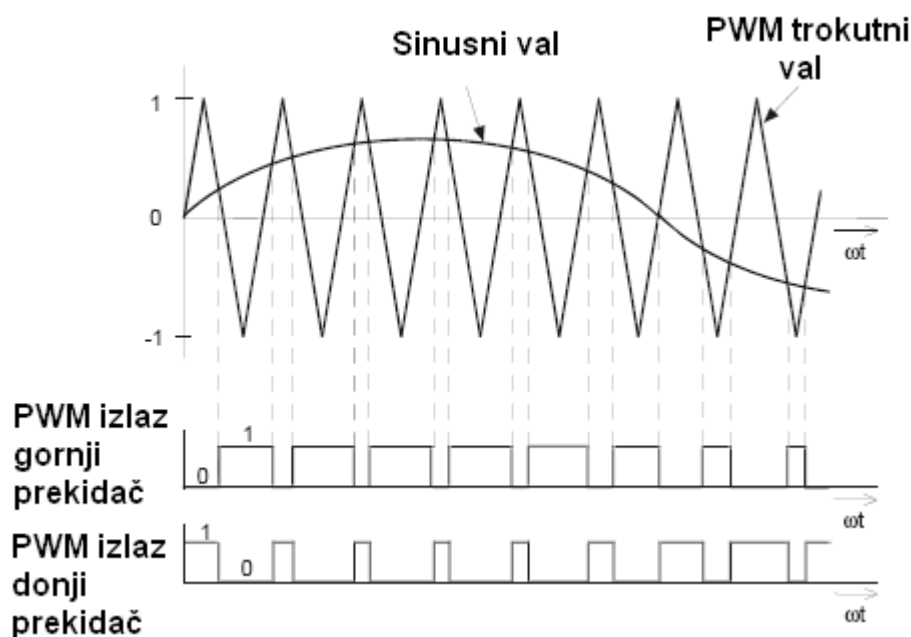
Obično se sinkroni elektromotori s permanentnim magnetima napajaju inverterskim mostovima. Inverter pretvara istosmjernu struju u izmjeničnu struju odgovarajuće frekvencije i amplitude. Tipični trofazni inverter je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 30. Trofazni inverter [19]

Inverter se sastoji od 3 dijela (polu-mosta) kod kojih su gornji i donji prekidač komplementarno regulirani. To znači da kad je gornji uključen, donji mora biti isključen i obrnuto. Vrijeme isključenja uređaja napajanja je dulje od vremena

uključenja, pa mora postojati neka razlika u vremenu prije isključenja jednog tranzistora i uključenja njegovog komplementarnog dijela. Izlazni napon je najčešće kreiran sa PWM-om (pulse width modulation – podešavanje širine pulsa) gdje se jednakokračni trokutni val uspoređuje sa osnovnom frekvencijom sinusnog vala. Točke presjeka između ta dva vala označuju točke na kojim se prebacuju gornji i donji prekidač invertera. Ta tehnika je prikazana na slici 29. Trofazni valovi naponi su međusobno zakrenuti za 120° , te se tako opskrbljuje trofazni elektromotor. [19]



Slika 31. PWM - Pulse Width Modulation (podešavanje širine pulsa) [19]

4.6.3 Regulacija u normalnim uvjetima rada

Uz pretpostavku idealnog sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima sa konstantnim induktivitetom statora $L_S = \text{const.}$, jednadžbe:

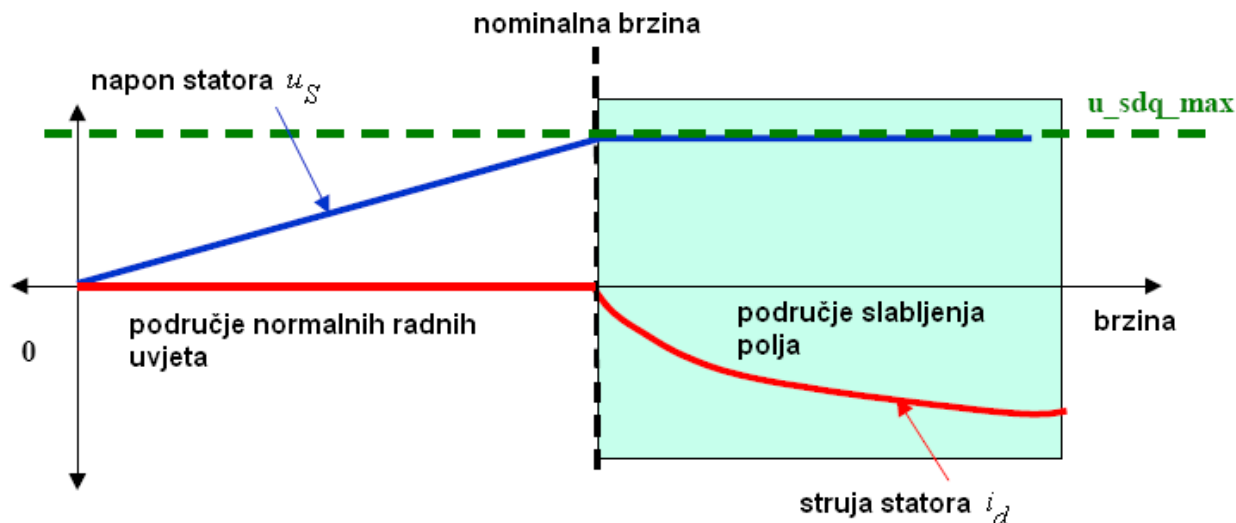
(4.19) (4.20) i (4.21)

se mogu zapisati kao:

$$u_{Sq} = R_S i_{Sq} + L_S \frac{d}{dt} i_{Sq} + \omega_F (L_S i_{Sd} + \psi_M) \quad (4.25)$$

Maksimalna efikasnost sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima se dobije kada je komponenta $i_{sd}=0$. Regulator slabljenja polja postavlja $i_{sd}=0$.

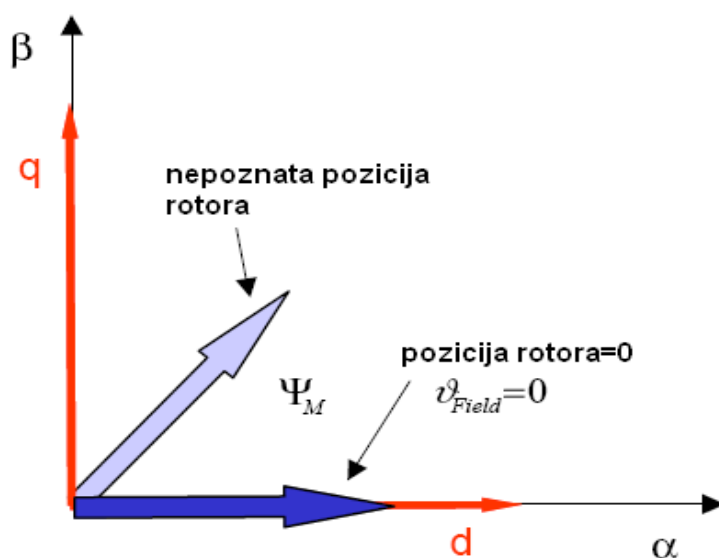
[19]



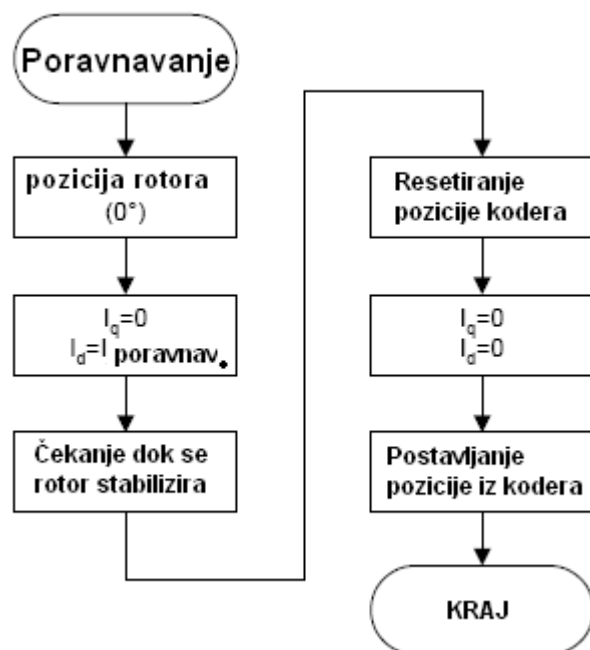
Slika 32. Nominalna brzina i područje slabljenja polja [19]

4.6.4 Resetiranje pozicije namještanjem rotora

Nakon resetiranja, pozicija rotora je nepoznata. Kao što je pokazano na slici 31, pozicija rotora mora biti poravnata s d osi u d-q koordinatnom sustavu prije uključanja elektromotora. Algoritam poravnavanja pozicije rotora je prikazan na slici 32. Najprije se pozicija rotora postavlja na nulu neovisno o stvarnoj poziciji rotora. Zatim se struja i_d postavlja na vrijednost struje poravnavanja. Rotor je sada poravnat na zahtijevanu poziciju. Nakon stabilizacije rotora, koder i struja i_d se postavljaju na nulu i poravnavanje je završeno. [19]



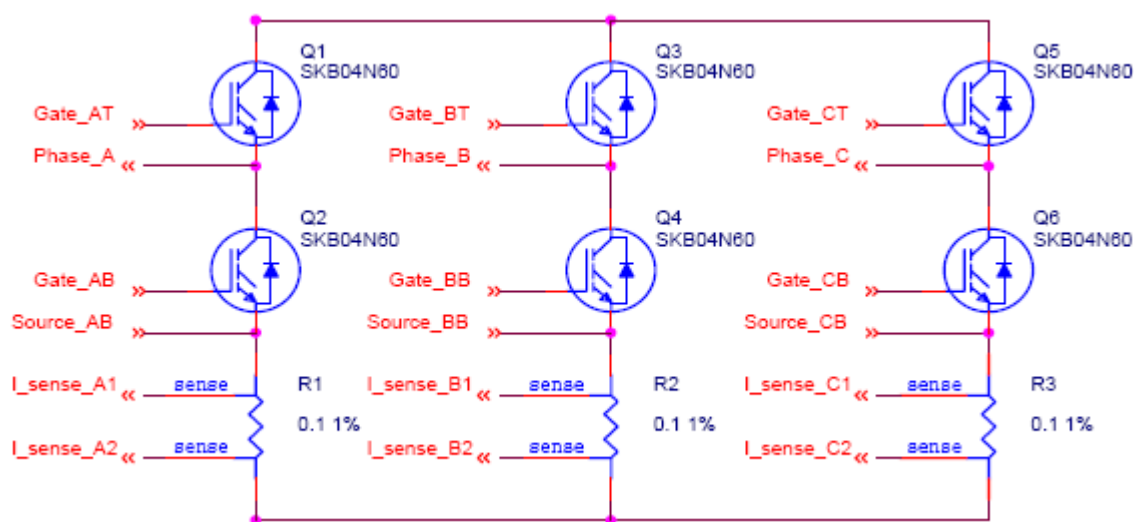
Slika 33. Namještanje rotora [19]



Slika 34. Blok dijagram namještanja rotora [19]

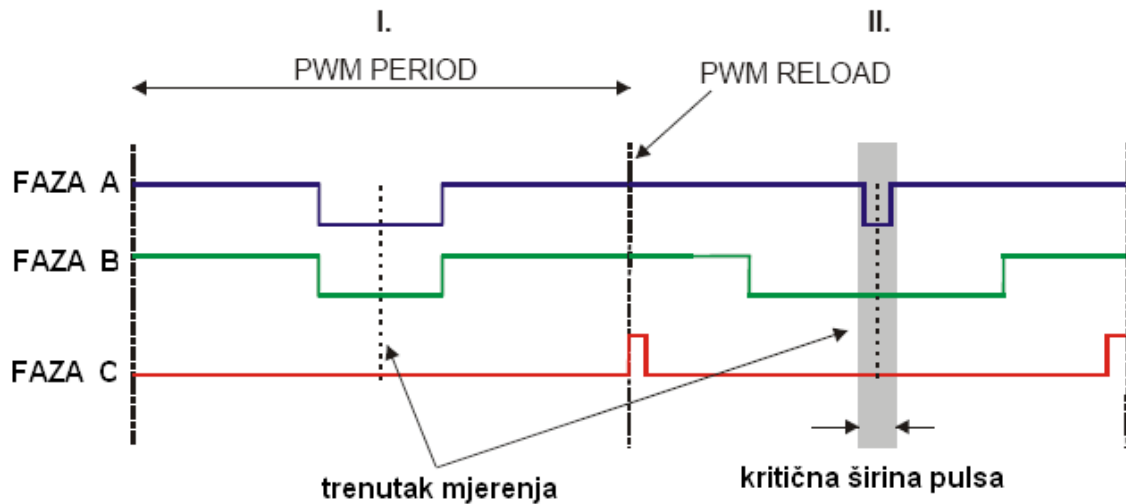
4.6.5 Određivanje struja

Jakost faznih struja moguće je mjeriti mjernim šantovima ili Halovim sondama. U ovom primjeru se fazne struje se mjere preko šant otpornika u svakoj fazi. Šant je otpornik vrlo malog i precizno određenog otpora, na kojem se mjeri pad napona, proporcionalan jakosti struje koja prolazi tim otpornikom. Vrijednost takvih otpornika nužno mora biti mala (0.1 - 0.2 ohma). Kao što se vidi iz slike 33, struje se ne mogu mjeriti u svakom trenutku. Tako se na primjer struja faze A (koja se mjeri na šantovom otporniku R1) može mjeriti jedino ako je tranzistor Q2 uključen. Isto tako struja faze B se može mjeriti samo ako je tranzistor Q4 uključen, a struja faze C samo ako je Q6 uključen.



Slika 35. Mjerenje struje preko šantovih otpornika [19]

Kako bi se odredio trenutak u kojem se mora mjeriti struja, mora se napraviti analiza oblika napona. Na slici 34 su prikazani oblici napona dva različita PWM perioda. Kao što se vidi iz slike, najbolji trenutak za mjerenje struje je u sredini PWM perioda kada su uključena 2 donja tranzistora. Međutim sve 3 struje se ne mogu mjeriti iz jednog oblika napona. U drugom PWM periodu na slici 34, donji tranzistor faze A je uključen samo vrlo kratko vrijeme. Ako je to vrijeme kraće od kritičnog vremena, tada se struja ne može točno izmjeriti. To kritično vrijeme je određeno hardverskom konfiguracijom.



Slika 36. Oblici napona dva različita PWM perioda [19]

Dakle, mjerimo samo 2 struje, a treća se računa iz sljedeće jednadžbe:

$$0 = i_A + i_B + i_C \quad (4.26)$$

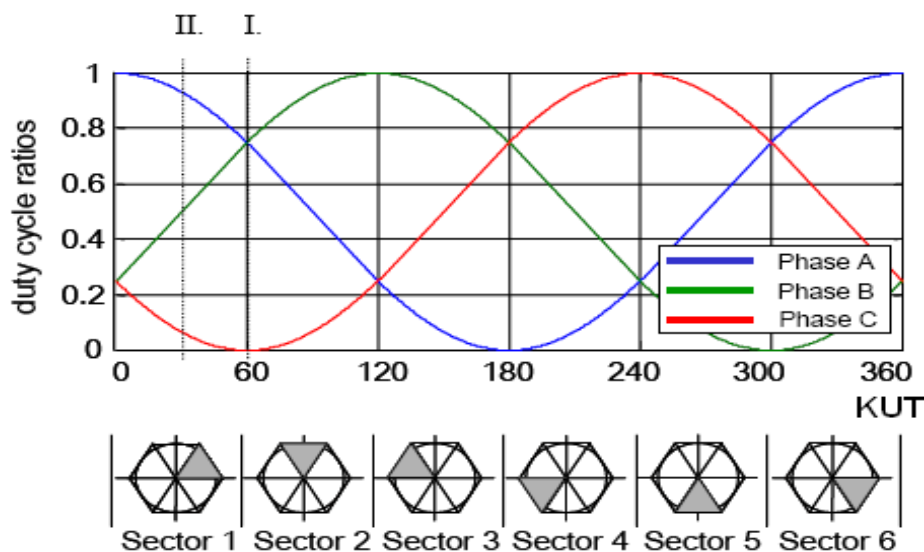
Sada se mora donijeti odluku koja će se faza računati. Najjednostavnija tehnika je da se računa struja koja ima najpozitivniju vrijednost napona faze. Tako se npr. iz slike 35 vidi da faza A generira najpozitivniji napon u dijelu od 0-60°, faza B generira najpozitivniji napon u dijelu od 60-120°.

Prema slici 35, računaju se struje:

Sektori 1 i 6: $i_A = -i_B - i_C \quad (4.27)$

Sektori 2 i 3: $i_B = -i_A - i_C \quad (4.28)$

Sektori 4 i 5: $i_C = -i_B - i_A \quad (4.29)$



Slika 37. Trofazni sinusni napon podijeljen po sektorima [19]

4.6.6 Određivanje aksijalne sile bušenja

Jednadžba momenta sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima (PMSM)

glasi:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left(\psi_M i_{Sq} \right)$$

gdje je:

T_e - moment

ψ_M - magnetski tok rotora

p – broj polova po fazi

i_{Sq} - vrijednost struje

Vidljivo je da se moment može kontrolirati i da ovisi jedino o struji i_{Sq} .

Jednadžba kugličnog navojnog vretena glasi: [21]

$$T = \frac{F_a \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot \nu} \quad (4.30)$$

gdje je:

T – moment

F_a – aksijalna sila bušenja [(3.13)]

l – konstanta kugličnog navojnog vretena (korak)

ν - učinkovitost kugličnog navojnog vretena [21]

Kombinacijom ove dvije jednadžbe dobije se izraz koji služi za računanje aksijalne sile kod bušenja:

$$F_a = \frac{3 \cdot \pi \cdot v \cdot p \cdot \psi_M \cdot i_{Sq}}{l} \quad (4.31)$$

Postoji i jednostavniji izraz za moment motora koji glasi: [20]

$$T_e = c_m \cdot i_{Sq} \quad (4.32)$$

gdje je:

T_e - moment

c_m - konstante momenta (uvodi se u izraz kao rezultat pojednostavljenja modela koji je moguć zbog konstantne uzbude - permanentni magneti)

Kombinirajući jednadžbe (4.32) i (4.30) dobije se izraz koji služi za računanje aksijalne sile kod bušenja:

$$F_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot v \cdot c_m \cdot i_{Sq}}{l} \quad (4.33)$$

Uzimajući u obzir sve konstante navedene u jednadžbi ($\frac{2 \cdot \pi \cdot v \cdot c_m}{l}$), jednadžbu za računanje aksijalne sile kod bušenja možemo zapisati u vrlo jednostavnom obliku:

$$F_a = k \cdot i_{sq} \quad (4.34)$$

gdje je:

$k = \text{konstanta} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v \cdot c_m}{l} \right)$

Vidljivo je da aksijalna sila bušenja ovisi samo o vrijednosti struje i_{Sq} i da ju možemo direktno kontrolirati strujom i_{Sq} .

5. Zaključak

Ovim radom su istražene mogućnosti određivanja sila rezanja u postupku bušenja na temelju izlaznih informacija regulatora sinkronih motora s permanentnim magnetima. Osnovnu motivaciju za rad je predstavljala potreba razvoja novih metoda za kontinuirani nadzor parametara trošenja reznih alata. Adaptivno vođenje alatnih strojeva prema postojanosti oštrice reznog alata ima za cilj realizaciju niza novih karakteristika alatnih strojeva vezanih uz povećanje sigurnosti i produktivnosti obradnog postupka te kvalitete obrađene površine.

U okviru ovoga rada objašnjena je obrada odvajanjem čestica, pri čemu je velika pažnja posvećena postupku bušenja. U nastavku je detaljno analiziran način rada regulatora sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima.

Važno je naglasiti da aksijalna sila kod bušenja u nekom zadanom procesu s definiranim materijalom obratka i geometrijom alata, ovisi o posmaku, promjeru svrdla i o stupnju istrošenosti alata. Određivanjem aksijalne sile kod bušenja na ovaj način, izbjegavaju se skupi senzori koji se danas koriste u te svrhe. Prednost je ta što se kontinuirano mjere stvarni uvjeti obrade, te se na taj način povećava produktivnost alata i strojeva, smanjuju se troškovi obrade, otvara se mogućnost nadzora radnog vijeka alata, te se povećava kvaliteta izradaka.

Rad pokriva nužne pretpostavke za provođenje eksperimentalnog dijela, koji će biti izvršen kasnije u statičkim i dinamičkim uvjetima na Katedri za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

6. Literatura

- [1] Alatni strojevi, www.hatz.hr/hrv/glasnik/Alatni%20strojevi1.htm
- [2] Blažević Z., Programiranje CNC tokarilice i glodalice, Virovitica 2004.
- [3] Udiljak T., CAM - predavanja
- [4] Mulc, T., Udiljak, T., Čuš, F., Milfelner, M. (2004). Monitoring Cutting-Tool Wear Using Signals from the Control System, Journal of Mechanical Engineering 50(2004)12,568-579
- [5] Brezak D., Doktorski rad, Zagreb 2007.
- [6] Omative systems, OMATIVE Adaptive Control & Monitoring Technology
- [7] Šavar Š., Obrada odvajanjem čestica 2, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [8] Ciglar D., Uvod značaj i podjela alatnih strojeva - predavanja
- [9] Math M., Udiljak T., Ciglar D., Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem
- [10] Cajner F., Alatni materijali - predavanja
- [11] Udiljak T., Uvod u programiranje NC strojeva - predavanja
- [12] Rebec B., Rezni alati, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [13] Ciglar D., Obradni sustavi - predavanja
- [14] Balder D., Diplomski rad 2008.
- [15] Salopek M., Diplomski rad 2009.
- [16] Skalicki, B.: Elektrotehnika u strojarstvu –Elektromotorni pogoni, Zagreb, 1990.
- [17] Skalicki, B., Grilec, J. : Električni strojevi i elektromotorni pogoni, Zagreb, 2005.
- [18] Neodymium magnet, http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnets
- [19] Freescale Semiconductor, Inc., *Designer Reference Manual, 3-Phase PM Synchronous Motor Torque Vector Control, DRM018, 2003*
- [20] Predavanja iz kolegija Upravljanje električnim strojevima, Praktikum upravljanja električnim strojevima, Bez kolektorski istosmjerni strojevi, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009/2010
- [21] Ball screw, http://en.wikipedia.org/wiki/Ball_screw